This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

B 427833

Transferred to the
GENERAL LIBRARY.

TA
145
.D29

MANUEL

DE L'INGÉNIEU

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUS
AU GRADE D'INGÉNIEUR

Ancien élève de l'École Polytechnique

A. DEBAUVE

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

PREMIER FASCICULE

AVEC UN ATLAS

Algèbre. — Géométrie analytique. — Calcul différentiel et intégra
Géométrie descriptive. — Coupe des pierres.
Charpente

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR

SUCCESSEUR DE VICTOR DALMONT

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

Quai des Augustins, 49

1871

Nous avons publié précédemment, comme introduction au *Manuel de l'Ingénieur des Ponts et Chaussées*, le

COURS

DE

MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES

A L'USAGE DES CANDIDATS

AUX EMPLOIS DE CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES

PAR

L. CASTELNAU

Qui a été honoré d'une importante souscription
de S. E. le Ministre des Travaux publics.

PRIX DU CASTELNAU

Cours de Mathématiques appliquées

BROCHÉ, 13 FRANCS; RELIÉ, 15 FRANCS.

PRÉFACE

Le décret du 7 mars 1868 a déterminé le mode et les conditions des épreuves que devront subir les conducteurs des ponts et chaussées pour être admis au grade d'Ingénieur. On s'est proposé dans ce décret de rendre les épreuves plus faciles, en débarrassant le programme de tout ce qui est science pure et en y maintenant seulement, en même temps que les notions scientifiques indispensables, tout ce qui touche à l'art de l'Ingénieur.

Bien que réduit dans ce sens, le champ d'études ne laisse point que d'être encore très-vaste, et c'est entreprendre une lourde tâche que de vouloir le parcourir tout entier.

En l'état actuel, cette tâche est d'autant plus lourde que souvent on ne sait où trouver le développement des matières exigées par le programme : sans doute il existe sur chaque partie d'excellents ouvrages, mais ils sont généralement trop étendus pour servir à la préparation d'un examen, ou trop chers pour être abordables à tous.

Les considérations précédentes nous ont porté à croire qu'un traité des connaissances exigées pour l'examen d'Ingénieur des

ponts et chaussées pourrait être de quelque utilité, et c'est ce traité que nous présentons au public.

L'ordre suivi sera celui du programme annexé au décret du 7 mars 1868; de nombreux dessins accompagneront le texte. Ce n'est pas un simple résumé que nous voulons faire : le format et les caractères adoptés pour l'impression nous permettront de traiter complétement toutes les questions et de condenser en quelques volumes les notions nécessaires.

Les candidats ne doivent pas être interrogés sur les mathématiques; cependant il est impossible de posséder pleinement l'art de l'Ingénieur si l'on n'a pas quelques notions de calcul différentiel et intégral et de géométrie analytique : aussi jugeons-nous indispensable d'exposer dans la première section de l'ouvrage les principales propriétés algébriques et géométriques dont l'application se présente dans la pratique. Nous nous attacherons surtout à faire comprendre les propositions énoncées, sans nous arrêter aux détails de démonstration et aux discussions de formules : nous imposerons de la sorte au lecteur un mince surcroît de travail qui aura pour effet de rendre plus faciles à traiter et à saisir bien des questions subséquentes.

La publication que nous entreprenons aujourd'hui ne s'adresse pas seulement aux candidats au grade d'Ingénieur; les fascicules séparés constitueront autant de traités distincts qui peut-être pourront être utiles aux employés des différents services confiés à l'administration des ponts et chaussées.

Pour nous guider dans notre long travail, nous n'avons qu'à consulter les livres et les mémoires dans lesquels, depuis quarante ans,

tant d'Ingénieurs ont mis leur expérience, leur science et leur talent ; notre mission consistera à classer les faits et à les comparer, en un mot à réunir en faisceau une masse de documents épars. Notre seul mérite, si nous réussissons, sera d'avoir cherché à rendre service au corps laborieux et intelligent des conducteurs des ponts et chaussées.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

PRÉFACE. VII

ALGÈBRE.

CALCUL DES VALEURS ARITHMÉTIQUES DES RADICAUX. 1
Exposants fractionnaires. 2
Exposants incommensurables. 3
ARRANGEMENTS. PERMUTATIONS. COMBINAISONS.
Arrangements. 3
Permutations. 4
Combinaisons. 4
FORMULE DU BINOME. 5
Sommation des piles de boulets. . . . 6
Pyramide de boulets à base carrée. . . 7
Pyramide triangulaire. 7
Pile à base rectangulaire. 7
SÉRIES. 8
Règle I. 8
Règle II. 9
Du nombre (e). 9
Théorie des logarithmes. 10
Logarithmes. 11
Identité des logarithmes algébriques et des logarithmes arithmétiques. . . . 11
Passer d'un système à l'autre. 12
Logarithmes népériens. 12
Logarithmes négatifs. 12
Usage des logarithmes. 12
DES DÉRIVÉES. 12
Règles générales. 13
Définitions. 13
Exemples. 14
Dérivées des fonctions circulaires. . . 15
Dérivées des fonctions circul. inverses. 15
De la variation des fonctions. 15
Dérivée d'une fonction de plusieurs variables. 16
Dérivée des fonctions composées. . . 17
Dérivée des fonctions implicites. . . 17
Des fonctions primitives. 17
Développement des fonctions en séries. 18
Application. 20
Développements de $\sin x$ et $\cos x$ et de $L(1+x)$. 20
NOTIONS SOMMAIRES SUR LA THÉORIE GÉNÉRALE DES ÉQUATIONS. 20
Équations numériques de degré quelconque. 21
Théorème fondamental. 21
Relations entre les coefficients d'une équation et ses racines. 21

Pages

Des racines égales. 21
Recherche des racines réelles. 21
Equations transcendantes. 22
Calcul des quantités imaginaires. . . 22
Multiplication et division des expressions imaginaires. 22
Résolution des équations du 3e degré. 23
NOTIONS SUR LES INFINIMENT PETITS, SUR LE CALCUL DIFFÉRENTIEL ET SUR LE CALCUL INTÉGRAL. 25
Des infiniment petits. 25
De la différentielle. 25
Différentielle d'une fonction de plusieurs variables. 27
Dérivée d'une fonction composée. . . . 27
Dérivée ou différentielle d'une fonction implicite $\varphi(x.y=0)$. 27
Dérivées et différentielles de divers ordres. 27
Du calcul intégral. 27
Intégration par partie. 28
Exemple. 28
Intégrales définies. 28
Quelques notions du calcul des probabilités. 29
Théorème de Bernouilli. 30
Tables de mortalité 30
Vie probable. 30
Vie moyenne. 30
Rentes viagères. 31

GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE.

GÉOMÉTRIE PLANE. 32
Considérations générales. 32
Homogénéité. 34
Transformation des coordonnées rectilignes. 34
Cas particuliers des coordonnées rectangulaires. 35
Classification des lignes algébriques. 36
Ligne droite. 36
Construction de l'équation du 1er degré. 36
Signification des coefficients. 37
Problèmes. 38
Distance de deux points $x'y'$, $x''y''$. . 38
Intersection de deux droites. 39
Angle de deux droites. 39
Equation de la perpendiculaire menée par un point à une droite donnée. . 39
Distance d'un point à une droite. . . . 39
Théorie des tangentes. 40
Asymptotes. 40

	Pages
Calcul des asymptotes pour les courbes algébriques	41
Centre d'une courbe	42
Diamètre d'une courbe	42
COURBES DU SECOND DEGRÉ	43
Construction des lignes du 2e degré	43
Genre ellipse	44
Genre hyperbole	45
Genre parabole	46
Centre des courbes du 2e degré	48
Diamètre des courbes du 2e degré	49
Réduction de l'équation du 2e degré à la forme la plus simple	50
Réduction de l'équation du 2e degré dans le cas de l'ellipse et de l'hyperbole	50
Étude de l'ellipse	51
Distance d'un point de la courbe au centre	51
Foyers de l'ellipse	52
Construction de l'ellipse par points	53
Directrices de l'ellipse	53
Tangente à l'ellipse. — Normale	54
Construction de la tangente à l'ellipse	55
Diamètres	56
Cordes supplémentaires	57
Relations entre les diamètres conjugués	57
De l'hyperbole	59
Directrices	60
Tangente et normale	60
Construction de la tangente à l'hyperbole	60
Diamètres	61
Asymptotes de l'hyperbole	61
Hyperbole rapportée à ses asymptotes	62
Parabole	63
Foyer de la parabole	63
Directrice	64
Construire la parabole par points	64
Tangente et normale	65
Construire la tangente à la parabole	66
Diamètres	66
Rapporter la parabole à un diamètre et à la tangente à l'extrémité de ce diamètre	67
Des coordonnées polaires	67
Équations de la ligne droite	67
Courbes du 2e degré	68
Ellipse	68
Hyperbole	68
Parabole	68
Tangentes aux courbes en coordonnées polaires	69
Exemple. — La spirale d'Archimède	69
Etudier la courbe $\rho = \frac{a \sin \omega}{\omega}$	70
Autres exercices	70
Étude de quelques courbes à coordonnées rectilignes	70

	Pages
Calcul de l'aire d'une courbe plane	73
Aire de l'ellipse	74
Aire d'un segment d'hyperbole	75
Aire d'un segment de parabole	76
Longueur d'un arc de courbe plane	76
Des sections coniques	76
GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE A TROIS DIMENSIONS	78
Coordonnées rectilignes	78
Représentation des surfaces par une équation et réciproquement	79
Représentation des lignes par deux équations et réciproquement	79
Un point est représenté par un système d'équations à trois variables	79
Transformation des coordonnées. — Théorie des projections	80
Théorème fondamental	80
Problème. — Trouver l'angle de deux droites dont on donne les angles avec les trois axes des coordonnées	80
Changement des axes	82
Du plan	82
Angles de la normale au plan avec les axes	83
Angle de deux plans	83
Distance d'un point à un plan	83
Équations d'une droite	83
Intersection d'une droite et d'un plan	84
Angles d'une droite avec les axes de coordonnées	84
Notions sur les surfaces du 2e degré	84
Plans diamétraux	85
Diamètre	85
Plans principaux	85
Discussion des surfaces à centre	85
Ellipsoïde	85
Hyperboloïde à une nappe	86
Hyperboloïde à deux nappes	86
Génératrices rectilignes de l'hyperboloïde à une nappe	87
Surfaces dénuées de centre	88
Paraboloïde elliptique	88
Paraboloïde hyperbolique	88
Génératrices rectilignes du paraboloïde hyperbolique	89
Tangente à une courbe de l'espace	89
Plan osculateur à une courbe	90
Plan tangent à une surface	90
Courbure des lignes planes	91
Développées et développantes	92
Courbure des courbes non planes	93
Des lignes de courbure d'une surface	93
Leurs propriétés principales	93
Des hélices	94
Tangente à l'hélice	95
Projection de l'hélice sur un plan perpendiculaire à la base du cylindre	96
Hélicoïdes gauches	96

FIN DE LA TABLE.

MANUEL

DE

L'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

(PREMIÈRE SECTION)

PREMIÈRE PARTIE

ALGÈBRE

CALCUL DES VALEURS ARITHMÉTIQUES DES RADICAUX.

D'une manière générale, la racine $n^{ième}$ d'un nombre positif a est un nombre positif, commensurable ou incommensurable, qui, élevé à la $n^{ième}$ puissance reproduit a, et ce nombre est la valeur arithmétique du radical $\sqrt[n]{a}$.

Ceci posé, remarquons que les règles de la multiplication donnent :

$$(abc)^m = abc \times abc \times abc. \ldots = a^m b^m c^m$$
$$\left(\frac{a}{b}\right)^m = \frac{a}{b} \times \frac{a}{b} \times \frac{a}{b} \ldots = \frac{a^m}{b^m}$$
$$(a^m)^n = a^m \times a^m \times a^m \ldots = a^{mn},$$

ce qui signifie : 1° qu'on élève un produit à une certaine puissance en élevant chaque facteur séparément à cette puissance; 2° qu'on élève une fraction à une certaine puissance en élevant séparément les deux termes à cette puissance; 3° qu'on élève un nombre à deux puissances successives en l'élevant au produit de ces puissances.

De là nous déduisons les propositions suivantes :

1° $\sqrt[n]{a}\sqrt[n]{b}\sqrt[n]{c} = \sqrt[n]{abc}$;

2° $\dfrac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}} = \sqrt[n]{\dfrac{a}{b}}$;

car en élevant les deux membres de ces égalités à la $n^{ième}$ puissance on obtient des identités :

3° $\left(\sqrt[n]{a}\right)^m = \sqrt[n]{a}\sqrt[n]{a}\sqrt[n]{a}\ldots\ldots = \sqrt[n]{a\times a\times a\times\ldots\ldots} = \sqrt[n]{a^m}$;

4° $\sqrt[n]{a^{np}} = a^p$;

5 $\sqrt[m]{\sqrt[n]{a}} = \sqrt[mn]{a}$;

6° $\sqrt[n]{a^m} = \sqrt[np]{a^{mp}}$.

Cette dernière relation permet de réduire plusieurs radicaux au même indice, c'est ainsi qu'on a :

$$\sqrt[n]{a}\sqrt[p]{b}\sqrt[q]{c} = \sqrt[npq]{a^{pq}}\sqrt[npq]{b^{nq}}\sqrt[npq]{c^{np}} = \sqrt[npq]{a^{pq}b^{nq}c^{np}}.$$

EXPOSANTS FRACTIONNAIRES.

On a vu que $\sqrt[4]{a^{16}}$, par exemple, était égal à a^4, c'est-à-dire à $a^{\frac{16}{4}}$. Généralisons cette notion, et convenons de dire que $\sqrt[n]{a^m}$ s'écrira $a^{\frac{m}{n}}$, $\frac{m}{n}$ étant un exposant fractionnaire.

Nous allons montrer que nous pouvons, sans altérer les résultats, appliquer à cet exposant fractionnaire les procédés de calcul qui ont été démontrés pour les exposants entiers.

1° $$a^{\frac{p}{q}} \times a^{\frac{p'}{q'}} = a^{\frac{p}{q}+\frac{p'}{q'}}.$$

En effet, $$a^{\frac{p}{q}} = \sqrt[q]{a^p} \quad a^{\frac{p'}{q'}} = \sqrt[q']{a^{p'}}$$

$$a^{\frac{p}{q}} \times a^{\frac{p'}{q'}} = \sqrt[q]{a^p} \times \sqrt[q']{a^{p'}} = \sqrt[qq']{a^{pq'}}\sqrt[qq']{a^{p'q}} = \sqrt[qq']{a^{p'q+pq'}} = a^{\frac{p'q+pq'}{qq'}} = a^{\frac{p}{q}+\frac{p'}{q'}}.$$

2° On montre de même que $$\frac{a^{\frac{p}{q}}}{a^{\frac{p'}{q'}}} = a^{\frac{p}{q}-\frac{p'}{q'}}.$$

3° et que
$$\begin{cases} \left(a^{\frac{p}{q}}\right)^m = a^{\frac{mp}{q}} \\ \sqrt[m]{a^{\frac{p}{q}}} = a^{\frac{p}{mq}} \\ \left(a^{\frac{p}{q}}\right)^{\frac{p'}{q'}} = a^{\frac{pp'}{qq'}} \end{cases}$$

Exemples : $\sqrt[3]{a} = a^{\frac{1}{3}}$ $a^{-\frac{1}{3}} \times a^{\frac{1}{3}} = a^{\frac{1}{2}}$ $\frac{a}{a^{\frac{2}{3}}} = a^{\frac{1}{3}}$ $\left(a^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{3}{2}} = a$.

EXPOSANTS INCOMMENSURABLES.

Les mêmes règles s'appliquent aux exposants incommensurables, car ces nombres sont toujours compris entre deux fractions $\frac{n}{m}$ et $\frac{n+1}{m}$ dont la différence $\frac{1}{m}$ peut devenir aussi petite qu'on le veut.

EXPOSANTS NÉGATIFS.

Nous admettrons par définition que $\frac{1}{a^m} = a^{-m}$, ce qui permettra d'écrire toujours $\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$ quel que soit le signe de la différence. Nous montrerons que les règles relatives au calcul des exposants entiers s'appliquent aussi aux exposants négatifs.

1° La formule $a^m \times a^n = a^{m+n}$ devient, si n est négatif et égal à $-n'$, $a^{m-n'} = a^m \times a^{-n'}$, en effet, $a^m \times a^{-n'} = \frac{a^m}{a^{n'}} = a^{m-n'}$.

Si m et n sont négatifs et égaux à $-m'$ et $-n'$, il vient alors

$$a^{-m'} \times a^{-n'} = a^{-m'-n'}, \quad \text{en effet,} \quad a^{-m'} \times a^{-n'} = \frac{1}{a^{m'}} \times \frac{1}{a^{n'}} = \frac{1}{a^{m'+n'}} = a^{-m'-n'}.$$

2° La règle de la multiplication étant applicable aux exposants négatifs, celle de la division l'est aussi.

3°
$$(a^{-m'})^n = \left(\frac{1}{a^{m'}}\right)^n = \frac{1}{a^{m'n}} = a^{-m'n},$$
$$(a^m)^{-n'} = \frac{1}{(a^m)^{n'}} = \frac{1}{a^{mn'}} = a^{-mn'},$$
$$(a^{-m'})^{-n'} = \frac{1}{(a^{-m'})^{n'}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{a^{m'}}\right)^{n'}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{a^{m'n'}}\right)} = a^{m'n'}.$$

Exemples : $a^5 \times a^{-3} = a^2$ $a^{-3} \times a^{-2} = a^{-5}$ $\frac{a^{-3}}{a^2} = a^{-5}$ $(a^{-2})^3 = a^{-6}$ $(a^{-3})^{-2} = a^6$.

ARRANGEMENTS. PERMUTATIONS. COMBINAISONS.

ARRANGEMENTS.

On appelle arrangement de m lettres n à n, tous les groupes que l'on peut former avec (n) de ces m lettres, deux groupes devant différer soit par les lettres qui y entrent soit par l'ordre des lettres.

Ainsi il y a six arrangements de trois lettres : $a.b.c$ deux à deux qui sont : $ab.ac.ba.bc.ca.cb$.

Désignons par A_n^m le nombre des arrangements de m lettres n à n; si tous les arrangements de ces m lettres $n-1$ à $n-1$ étaient formés, on obtiendrait des arrangements n à n, en écrivant successivement à la suite de chaque groupe de $n-1$ lettres chacune des $m-n+1$ lettres restantes. Les groupes de lettres ainsi formés ne se confondent point, car ils diffèrent de l'un à l'autre soit par la dernière lettre, soit par l'ordre des $n-1$ premières, et de plus tous les arrangements de n lettres ont été formés, car un de ces arrangements se compose d'un arrangement de $n-1$ lettres suivi d'une autre lettre, donc

$$A_n^m = A_{n-1}^m (m-n+1) \quad \text{d'où l'on déduit successivement}$$
$$A_{n-1}^m = A_{n-2}^m (m-n+2)$$
$$A_{n-2}^m = A_{n-3}^m (m-n+3)$$
$$\vdots$$
$$A_2^m = A_1^m (m-1)$$
$$A_1^m = m.$$

l'on multiplie toutes ces égalités entre elles, on arrive à

$$A_n^m = m(m-1)(m-2)\ldots\ldots(m-n+1).$$

PERMUTATIONS.

Les permutations de m lettres comprennent les différents groupes que l'on peut former avec ces m lettres ou objets placés sur une ligne droite. C'est le cas particulier des arrangements dans lequel on fait $m=n$. Le nombre des permutations de m objets s'écrit P_m.

Si nous avions les permutations en nombre P^{m-1} de $m-1$ lettres, et que nous placions une $m^{ième}$ lettre successivement à tous les rangs de chacune de ces permutations, nous dériverions de chaque groupe m groupes nouveaux, et il est évident que l'ensemble contiendrait toutes les permutations de m lettres, et toutes une seule fois, d'où la relation

$$P^m = mP^{m-1}$$
$$P^{m-1} = (m-1)P^{m-2}$$
$$\vdots$$
$$P^2 = 2P_1$$
$$P_1 = 1.$$

Si l'on multiplie toutes ces égalités entre elles, on arrive à

$$P^m = 1.2.3\ldots\ldots m.$$

COMBINAISONS.

On appelle combinaisons de m lettres n à n les produits différents que l'on peut former avec n de ces m lettres. Le nombre en est exprimé par C_n^m.

Si nous avions tous ces groupes, et que nous formions les permutations des n lettres qui composent chacun d'eux, il est évident que nous obtiendrons tous les arrangements de m lettres n à n et que nous aurons $A_n^m = C_n^m \times P_n$.

D'où $C_n^m = \frac{A_n^m}{P_n} = \frac{m(m-1)(m-2)\dots(m-n+1)}{1.2.3\dots n}$, ce qui peut encore s'écrire en multipliant haut et bas par $1.2.3\dots(m-n)$

$$C_n^m = \frac{1.2.3\dots(m-n)(m-n+1)\dots(m-1)m}{1.2.3\dots m-n \quad 1.2.3\dots n}.$$

FORMULE DU BINOME.

On sait que le produit de deux polynomes est égal à la somme des termes que l'on obtient en multipliant chacun des termes du multiplicande par chacun des termes du multiplicateur, et qu'en général le produit de plusieurs polynômes est la somme des produits que l'on obtient en prenant de toutes les manières possibles un terme dans chacun des polynômes proposés.

Appliquant cette règle au produit $(x+a)(x+b)\dots(x+k)$, nous aurons

$$(x+a)(x+b)\dots(x+h)(x+k) = x^m + x^{m-1}\Sigma a + x^{m-2}\Sigma ab + x^{m-3}\Sigma abc + x^{m-4}\Sigma abcd\dots + abc\dots hk.$$

Le coefficient du 2e terme est la somme des lettres $a.b\dots h.k$. Le coefficient du 3e terme est la somme de leurs produits deux à deux et ces produits sont au nombre de $\frac{m(m-1)}{1.2}$ en admettant qu'il y ait m facteurs tels que $(x+a)$; le coefficient du $n^{ième}$ terme est la somme de leurs produits $n-1$ à $n-1$, et ces produits sont au nombre de $\frac{m(m-1)\dots(m-n+2)}{1.2\dots(n-1)}$; le dernier terme est le produit des m lettres $a.b.c\dots h.k$.

On déduit de ce qui précède l'expression de $(x+a)^m$ en faisant $a=b=\dots=h=k$, et l'on a

$$(x+a)^m = x^m + max^{m-1} + \frac{m(m-1)}{1.2}a^2x^{m-2}\dots + \frac{m(m-1)(\dots m-n+1)}{123\dots n}a^nx^{m-n}+\dots + \dots + a^m.$$

Ce qui peut s'écrire encore :

$$(x+a)^m = x^m + C_1^m ax^{m-1} + C_2^m a^2x^{m-2}\dots + C_n^m a^nx^{m-n}\dots + C_{m-1}^m a^{m-1}x + a^m.$$

Remarques. 1° Les coefficients de deux termes également distants des extrêmes sont égaux, car le nombre des combinaisons de m lettres n à n est égal au nombre des combinaisons de m lettres $m-n$ à $m-n$, puisqu'à chaque groupe des premières correspond un groupe des secondes.

2° Si l'on multiplie le coefficient du dernier terme obtenu par l'exposant de x

dans ce terme et qu'on le divise par le rang de ce terme, on a le coefficient du terme suivant.

3° Les coefficients vont en augmentant des termes extrêmes jusqu'au terme du milieu si m est pair, et jusqu'aux termes du milieu si m est impair. Car on passe d'un terme au suivant en le multipliant par $\frac{m-n+1}{n}$, et si l'on pose l'inégalité $\frac{m-n+1}{n} > 1$, on voit qu'elle sera vérifiée si $n < \frac{m+1}{2}$. Ainsi jusqu'au milieu, les coefficients vont en croissant, et comme on peut renverser le développement, on voit que les coefficients vont aussi en croissant de la fin au milieu.

4° Pour $x=1$ et $a=1$, on a

$$2^m = 1 + \frac{m}{1} + \frac{m(m-1)}{1.2} + \ldots + \frac{m}{1} + 1,$$

ou bien $$C_1^m + C_2^m + C_3^m \ldots + C_{m-1}^m + C_m^m = 2^m - 1.$$

5° Pour $x=1$ et $a=-1$, on déduit encore

$$C_1^m + C_3^m + C_5^m \ldots = 1 + \left(C_2^m + C_4^m \ldots\right).$$

Exemple :

$$(x+a)^8 = x^8 + 8ax^7 + 28a^2x^6 + 56a^3x^5 + 70a^4x^4 + 56a^5x^3 + 28a^6x^2 + 8a^7x + a^8.$$

Développement de $(a+b\sqrt{-1})^m$.

Les puissances successives de $\sqrt{-1}$ sont :

$(\sqrt{-1})^1 = \sqrt{-1}$, $(\sqrt{-1})^2 = -1$, $(\sqrt{-1})^3 = -\sqrt{-1}$, $(\sqrt{-1})^4 = 1$, et en général $(\sqrt{-1})^{4n+1} = \sqrt{-1}$, $(\sqrt{-1})^{4n+2} = -1$, $(\sqrt{-1})^{4n+3} = -\sqrt{-1}$, $(\sqrt{-1})^{4n} = 1$.

D'où l'on déduit

$$(a+b\sqrt{-1})^m = a^m - \frac{m(m-1)}{12} a^{m-2}b^2 + \frac{m(m-1)(m-2)(m-3)}{1234} a^{m-4}b^4 - \ldots\ldots$$
$$+ \sqrt{-1}\left[ma^{m-1}b - \frac{m(m-1)(m-2)}{1.2.3} a^{m-3}b^3 + \ldots\right]$$

Remarque. Des moyens analogues à ceux que nous avons employés pour le développement d'un binôme donneraient le développement d'un polynôme; mais la théorie du développement d'un polynôme n'a point d'intérêt pratique.

SOMMATION DES PILES DE BOULETS.

Problème : Trouver la somme des carrés des n premiers nombres entiers. On peut dresser le tableau suivant :

$$\begin{aligned}
2^3 &= (1+1)^3 = 1^3 + 3\times 1^2 + 3\times 1 + 1^3,\\
3^3 &= (2+1)^3 = 2^3 + 3\times 2^2 + 3\times 2 + 1^3,\\
4^3 &= (3+1)^3 = 3^3 + 3\times 3^2 + 3\times 3 + 1^3,\\
&\vdots\\
(n+1)^3 &= \qquad n^3 + 3n^2 + 3n + 1^3.
\end{aligned}$$

Faisant la somme de ces égalités, on a :

$$(n+1)^3 = 1 + 3\sum_1^n m^2 + 3\sum_1^n m + n,$$

ou bien $\sum_1^n m^2 = \dfrac{(n+1)^3 - 1 - n - 3\,\frac{n(n+1)}{2}}{3}$, car on sait que la somme des n premiers nombres est égale à $\frac{n(n+1)}{2}$. Il en résulte que la somme des carrés des n premiers nombres est égale à

$$\frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.$$

Pyramide de boulets à base carrée. On construit d'abord une base formée d'un carré ayant m boulets au côté; au-dessus on empile un carré de $m-1$ boulets au côté, et ainsi de suite, de sorte que la somme des boulets de la pyramide est égale à la somme des carrés des m premiers nombres,

Soit à

$$\frac{m(m+1)(2m+1)}{6}.$$

Pyramide triangulaire. Elle a pour base un triangle équilatéral de (m) boulets au côté; cette base comprend donc une série de tranches formées de m, $m-1$, $m-2 \ldots 2, 1$ boulets. Soit un total de $\frac{m(m+1)}{2}$ boulets, que l'on peut écrire $\frac{m^2}{2} + \frac{m}{2}$. La seconde assise de la pyramide a un boulet de moins au côté. Elle comprend donc

$$\frac{(m-1)^2}{2} + \frac{m-1}{2} \text{ boulets.}$$

La masse de la pyramide comprend donc un nombre de boulets égal à $\frac{\Sigma_1^m m^2}{2} + \frac{\Sigma_1^m m}{2}$. Soit

$$\frac{m(m+1)(2m+1)}{12} + \frac{m(m+1)}{4} = \frac{m(m+1)(m+2)}{6}.$$

Pile à base rectangulaire. Si les côtés de la base sont de m et n boulets, cette base comprendra mn boulets, la 2e assise $(m-1)(n-1)$ boulets, etc..., et si l'on pose $m-n=k$ ou $m=n+k$ le nombre cherché sera

$$\begin{aligned} X &= mn + (m-1)(n-1) + (m-2)(n-2)\ldots \\ &= n(n+k) + (n-1)(n-1+k) + (n-2)(n-2+k)\ldots + 1\,(1+k) \\ &= n^2 + (n-1)^2 \ldots + 1^2 + k\,(n + (n-1) + n-2)\ldots + 2 + 1) \\ &= \Sigma_1^n p^2 + k\Sigma_1^n p = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + k\frac{n(n+1)}{2} \\ &= \frac{n(n+1)(2n+3k+1)}{6}. \end{aligned}$$

SÉRIES.

On appelle série une suite indéfinie de quantités qui se forment successivement d'après une loi déterminée. La série est convergente lorsque la somme d'un nombre de plus en plus grand de ses termes tend vers une limite finie, divergente dans le cas contraire. Les progressions sont un cas particulier des séries, et la progression géométrique $a\,.\,aq\,.\,aq^2\,.\,aq^3\ldots$ décroissante est une série convergente dont la limite est $\frac{a}{1-q}$.

Il faut évidemment pour qu'une série à termes positifs soit convergente que ces termes tendent vers zéro ; mais ce n'est pas suffisant, car la série

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}\ldots + \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \ldots \frac{1}{2n} + \ldots$$

est convergente. En effet, la somme $\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \ldots \frac{1}{2n}$ est plus grande que n fois son dernier terme, c'est-à-dire plus grande que $n \times \frac{1}{2n}$ ou $\frac{1}{2}$. On peut donc toujours ajouter une demi-unité à la somme des n premiers termes.

Il a été donné diverses règles destinées à faire reconnaître la convergence d'une série; nous n'en citerons que deux qui sont sans exception :

RÈGLE I. Une série à termes positifs est convergente lorsqu'à partir d'un certain terme le rapport d'un terme au précédent est constamment inférieur à un nombre fixe k plus petit que l'unité. Elle est divergente dans le cas contraire.

Soit la série $u_0 + u_1 + u_2 \ldots + u_n + \ldots$, dans laquelle on a

	Ce qui peut s'écrire :	
$\frac{u_{n+1}}{u_n} < k$		$u_{n+1} < ku_n$
$\frac{u_{n+2}}{u_{n+1}} < k$		$u_{n+2} < ku_{n+1} < k^2 u_n$
$\frac{u_{n+3}}{u_{n+2}} < k$		$u_{n+3} < ku_{n+2} < k^3 u_n$
⋮		⋮

Donc la somme des termes à partir du $n^{ième}$ est moindre que $ku_n + k^2 u_n + k^3 u_n \ldots$, ce qui est la somme des termes d'une progression géométrique décroissante dont la limite est $\frac{ku_n}{1-k}$...

Règle II. Si les termes d'une série sont alternativement positifs et négatifs, et qu'ils décroissent indéfiniment, la série est convergente.

Soit la série $u_0 - u_1 + u_2 - u_3 + u_4 - u_5 + \ldots + u_{2n} - u_{2n+1} + \ldots$

Les sommes d'indice pair $S_2 = (u_0 - u_1)$, $S_4 = (u_0 - u_1) + (u_2 - u_3)$, $S_6 = (u_0 - u_1) + (u_2 - u_3) + (u_4 - u_5)$ sont toutes positives et vont en croissant, car les quantités entre parenthèses sont positives. Les sommes d'indice impair sont $S_3 = S_2 + u_3$, $S_5 = S_4 + u_4 \ldots\ldots$; elles sont donc supérieures aux sommes d'indice pair; on peut encore les écrire : $S_1 = u_0$, $S_3 = u_0 - (u_1 - u_2)$, $S_5 = u_0 - (u_1 - u_2) - (u_3 - u_4)$, et l'on voit qu'elles vont constamment en diminuant. Donc, les sommes d'indice pair croissent sans cesse tout en restant inférieures à l'une quelconque des sommes d'indice impair; celles-ci, au contraire, diminuent sans cesse et sont toujours supérieures à l'une quelconque des sommes d'indice pair. Chacune de ces sommes tend donc vers une limite, et, comme leur différence u_n diminue indéfiniment, les deux limites se confondent et la série est convergente. Exemple :

$$1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \ldots \quad \text{ou bien} \quad \frac{1}{1.2} - \frac{1}{1.2.3} + \frac{1}{1.2.3.4} - \frac{1}{1.2.3.4.5} - \ldots$$

qui converge très-rapidement.

DU NOMBRE (*e*).

On appelle e la limite de l'expression $\left(1 + \frac{1}{m}\right)^m$ lorsque (m) augmente indéfiniment. Si m est entier, on peut poser

$$\left(1 + \frac{1}{m}\right)^m = 1 + m.\frac{1}{m} + \frac{m(m-1)}{1.2}\frac{1}{m^2} + \frac{m(m-1)(m-2)}{1.2.3}\frac{1}{m^3} + \ldots$$
$$\ldots + \frac{m(m-1)(m-2)\ldots(m-n+1)}{1.2.3\ldots n}\frac{1}{m^n} + \ldots\ldots$$
$$= 1 + 1 + \frac{1 - \frac{1}{m}}{1.2} + \frac{\left(1 - \frac{1}{m}\right)\left(1 - \frac{2}{m}\right)}{1.2.3} + \ldots$$
$$\ldots + \frac{\left(1 - \frac{1}{m}\right)\left(1 - \frac{2}{m}\right)\left(1 - \frac{3}{m}\right)\ldots\left(1 - \frac{n-1}{m}\right)}{1.2.3\ldots n} + \ldots$$

et si m croît indéfiniment, on a

$$\lim\left(1 + \frac{1}{m}\right)^m = e = 1 + 1 + \frac{1}{1.2} + \frac{1}{1.2.3} + \frac{1}{1.2.3.4} + \ldots\ldots + \frac{1}{1.2.3\ldots n},$$

ce qui représente une série convergente dont la limite est comprise entre 2 et 3. En effet, l'expression précédente est moindre que

$$1 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \ldots\ldots + \frac{1}{2^n} \ldots = 1 + 1 + \frac{\frac{1}{2}}{1 - \frac{1}{2}} = 3.$$

On démontre que la limite de $\left(1+\frac{1}{m}\right)^m$ est la même quand on donne à m des valeurs fractionnaires ou incommensurables.

Valeur de e : $e = 2{,}71828\ \ 18284\ \ 59045\ldots$

THÉORIE DES LOGARITHMES.

1° **Les puissances successives d'un nombre plus grand que l'unité vont en croissant au delà de toute limite.**

Soit $a = 1+\alpha$, $a^m = (1+\alpha)^m = 1 + \frac{m}{1}\alpha + \frac{m(m-1)}{1.2}\alpha^2 + \ldots,$

donc $a^m > 1 + m\alpha$, et si l'on veut que a^m soit plus grand qu'une quantité donnée A, il suffira d'avoir $1 + m\alpha > A$, ou de prendre pour m une valeur supérieure à $\frac{A-1}{\alpha}$.

2° **Les puissances successives d'un nombre plus petit que l'unité vont en décroissant au-dessous de toute limite donnée.** Soit $a = \frac{1}{1+\alpha}$, on a $a^m = \frac{1}{(1+\alpha)^m}$ et $(1+\alpha)^m$ peut devenir aussi grand qu'on le veut, donc $\frac{1}{(1+\alpha)^m}$ ou a^m peut s'approcher de zéro autant qu'on le veut.

3° Si (a) est plus grand que l'unité, $\sqrt[n]{a}$ décroît quand n augmente, et peut s'approcher autant qu'on le veut de l'unité.

En effet, on peut toujours trouver $\sqrt[n]{a} < 1+\alpha$, car nous avons vu plus haut que l'on pouvait toujours avoir $(1+\alpha)^n > a$.

4° Si a est plus petit que l'unité, $\sqrt[n]{a}$ croît avec n et s'approche de l'unité aussi près qu'on le veut. En effet, a peut se représenter par $\frac{1}{a'}$, a' étant plus grand que l'unité, et $\sqrt[n]{a} = \frac{1}{\sqrt[n]{a'}}$.

5° La fonction a^x varie d'une manière continue avec x. Si a est > 0 et > 1, a^x croît avec x; en effet, donnons un accroissement h à x, la différence $a^{x+h} - a^x = a^x(a^h - 1)$ est positive, car si $h = \frac{m}{n}$, $a^h = \sqrt[n]{a^m}$, quantité supérieure à l'unité. Ainsi $a^{x+h} - a^x$ est toujours positif.

Je dis, en outre, qu'il y a toujours une valeur de h assez petite pour que $a^{x+h} - a^x$ soit $< \alpha$. En effet, soit $h < \frac{1}{n}$, on peut prendre n assez grand pour que $a^{\frac{1}{n}}$ ou $\sqrt[n]{a}$ diffère de l'unité d'une quantité moindre que $\frac{\alpha}{a^x}$; la quantité a^h étant moindre que $a^{\frac{1}{n}}$, puisque $h < \frac{1}{n}$ différera de l'unité d'une quantité plus petite que $\frac{\alpha}{a^x}$; par suite $a^h - 1 < \frac{\alpha}{a^x}$ et $a^{x+h} - a^x < a^x \cdot \frac{\alpha}{a^x}$ ou $< \alpha$.

Nous avons vu qu'on trouve toujours une valeur de x assez grande pour que a^x dépasse un nombre donné. On voit, d'après cela, que pour x variant de 0 à $+\infty$, a^x varie de 1 à $+\infty$ en passant par toutes les valeurs intermédiaires. L'expression a^x est donc une fonction continue, c'est-à-dire une quantité formée avec la variable x, et qui passe d'une valeur à une autre en prenant toutes les valeurs intermédiaires.

Si x varie de 0 à $-\infty$, et que l'on en désigne la valeur par $-m$, on peut écrire $a^x = \frac{1}{a^m}$, m variant de 0 à ∞. On voit, d'après cela, que pour x allant de 0 à $-\infty$, a^x ira de 1 à 0 en passant par toutes les valeurs intermédiaires.

Si $a > 0$ et < 1, pour x variant de 0 à $+\infty$, a^x variera de 1 à 0, x variant de 0 à $-\infty$, a^x variera de 1 à $+\infty$.

Logarithmes. Si nous avons la relation $a^x = b$, nous appellerons x le logarithme de b dans la base (a), et l'on écrit $x = \log_a b$. A chaque base correspond un système de logarithmes.

1° **Logarithme d'un produit est égal à la somme des logarithmes des facteurs**

$$a^x = b, \quad a^y = c, \quad a^z = d, \quad \text{d'où} \quad a^{x+y+z} = bcd,$$

et
$$\log bcd = x + y + z = \log b + \log c + \log d.$$

2° **Logarithme d'un quotient est égal à la différence des logarithmes des facteurs.**

$$a^x = b, \quad a^y = c, \quad \text{d'où} \quad \frac{a^x}{a^y} = .\frac{b}{c} = a^{x-y}, \quad \log\frac{b}{c} = x - y = \log b - \log c.$$

3° $\log a^m = m \cdot \log a$, car $\log a^m = \log(a.a.a.a...) = \log a + \log a = m.\log.a.$

4° $$\log \sqrt[n]{a} = \frac{1}{n}\log a.$$

5° L'unité a toujours pour logarithme 0, car $a^0 = 1$.

6° La base du système a pour logarithme l'unité, car $a^1 = a$.

Identité des logarithmes algébriques et des logarithmes arithmétiques. En arithmétique on prend deux progressions,

l'une géométrique (1) $1.a.a^2.a^3...$
l'autre arithmétique (2) $0.b.2b.3b...$

et l'on appelle logarithme d'un terme de (1) le terme correspondant de (2). Pour les nombres non compris dans les deux séries, on insère un pareil nombre de moyens entre deux termes correspondants de chacune de ces deux séries. Considérons les deux séries

$$1.a.a^2.a^3.a^4...$$
$$0.1.2.3.4...$$

et insérons $n-1$ moyens entre deux termes consécutifs de chacune d'elles, elles deviennent :

$$1.a^{\frac{1}{n}}.a^{\frac{2}{n}}.a^{\frac{3}{n}}... \quad a^{\frac{m}{n}}...,$$
$$0 \quad \frac{1}{n} \quad \frac{2}{n} \quad \frac{3}{n}... \quad \frac{m}{n}...$$

On voit bien sous cette forme l'identité des deux genres de logarithmes, car un nombre quelconque $a^{\frac{m}{n}}$ de la progression géométrique a pour logarithme l'exposant $\frac{m}{n}$ de la puissance à laquelle il faut élever la base (a) pour avoir le nombre proposé.

Passer d'un système à l'autre. Les logarithmes changent avec la base, on aura par exemple $a^x = b$, $a'^{x'} = b$. Dans cette dernière égalité, si nous prenons les logarithmes par rapport à la base (a) nous aurons

$$x' \log_a a' = \log_a b, \quad \text{d'où} \quad x' \quad \text{ou} \quad \log_{a'} b = \log_a b \times \frac{1}{\log_a a'}.$$

Logarithmes népériens. Néper prit pour base de son système de logarithmes le nombre incommensurable e. Ce système est peu commode et fut remplacé par le système de Briggs, dans lequel la base est le nombre dix. Le module d'un système de logarithmes est le nombre constant par lequel il faut multiplier le logarithme népérien L de ce nombre pour avoir le logarithme dans le système considéré. Le module du système vulgaire est $\mathrm{M} = \frac{1}{\mathrm{L}_{10}} = 0{,}434294\ldots$ C'est en cherchant le système dont le module est l'unité que Néper avait été conduit à prendre pour base le nombre (e).

Logarithmes négatifs. Si la base est > 1, ce qui est le cas du système vulgaire, les nombres plus petits que l'unité ont des logarithmes négatifs comme nous l'a montré l'étude des variations de la fonction a^x.

Usage des logarithmes. Les logarithmes sont un puissant moyen de calcul : c'est par un exercice soutenu qu'on arrive à le posséder pleinement.

DES DÉRIVÉES.

Lorsque deux quantités x et y sont liées entre elles, de telle sorte que les variations de l'une entraînent les variations de l'autre, on dit que ces deux quantités sont fonctions l'une de l'autre. Si l'on regarde y comme fonction de x, on écrit $y = f(x)$, et l'on appelle x la variable. Nous ne considérerons que les fonctions continues.

Ceci posé, nous appellerons dérivée d'une fonction la limite du rapport de l'accroissement positif ou négatif de cette fonction à l'accroissement positif de la variable, lorsque cet accroissement diminue de plus en plus. La dérivée d'une fonction $y=f(x)$ s'écrit $y'=f'(x)$. La dérivée de la dérivée est la dérivée seconde dela fonction ; la dérivée de la dérivée seconde est la dérivée tierce de la fonction, et ainsi de suite. Les dérivées successives sont représentées par $f'(x)\, f''(x)\, f'''(x)\ldots$ Nous verrons plus tard comment les dérivées sont liées aux courbes par lesquelles on peut représenter la fonction. Les accroissements d'une lettre a, se représentent par cette lettre précédée du delta grec : Δa.

Exemples : 1° $y = x^2$, on aura $y + \Delta y = (x + \Delta x)^2$,

d'où $$\Delta y = (x + \Delta x)^2 - x^2 = 2x \,.\, \Delta x + \Delta^2 x,$$

la dérivée est la limite de $\frac{\Delta y}{\Delta x} = 2x + \Delta x$, lorsque Δx diminue indéfiniment cette dérivée est donc $y' = 2x$.

2° **Dérivée de la fonction logarithmique** $y = a^x$.

(1) $y' = \lim\left(\frac{a^{x+\Delta x} - a^x}{\Delta x}\right) = \lim a^x \frac{a^{\Delta x} - 1}{\Delta x}$ posons $a^{\Delta x} - 1 = \alpha$; comme Δx est très-petit, $a^{\Delta x}$ différera très-peu de l'unité et α tendra vers zéro. Donc $a^{\Delta x} = 1 + \alpha$, d'où $\Delta x \log a = \log(1+\alpha)$ $\Delta x = \frac{\log(1+\alpha)}{\log a}$ et l'expression (1) devient $y' = \lim a^x \frac{\alpha \log a}{\log(1+\alpha)}$ ou bien $y' = \lim \frac{a^x \log a}{\frac{1}{\alpha}\log(1+\alpha)}$ dont le numérateur est constant et dont le dénominateur peut s'écrire en posant $\alpha = \frac{1}{n}$.

$$\frac{1}{\alpha}\log(1+\alpha) = \log(1+\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} = \log\left(1+\frac{1}{n}\right)^n = \text{à la limite } \log(e).$$

La dérivée de a^x est donc $a^x \frac{\log a}{\log e}$, ou $a^x La$ en prenant les logarithmes népériens.

3° **Dérivée de** $y = \log x$. On a $\log(x+\Delta x) - \log x = \log\frac{x+\Delta x}{x}$ par suite $y' = \lim \frac{\log\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)}{\Delta x}$. Posons $\frac{\Delta x}{x} = \alpha$, α tendra vers zéro avec Δx, il vient $\Delta x = \alpha x$, et $y' = \lim . \frac{\log(1+\alpha)}{\alpha x} = \frac{1}{x}\lim\frac{\log(1+\alpha)}{\alpha} = \frac{1}{x}\lim . \log(1+\alpha)^{\frac{1}{\alpha}}$; or α tendant vers zéro peut s'écrire $\frac{1}{n}$, donc $y' = \frac{1}{x}\lim . \log\left(1+\frac{1}{n}\right)^n = \frac{\log e}{x}$. La dérivée de $y = \mathrm{L}.x$ serait $y' = \frac{1}{x}$.

RÈGLES GÉNÉRALES. I. La dérivée d'une constante est nulle.

II. La dérivée d'une somme de fonctions d'une même variable x est la somme des dérivées partielles. Soit $S = u + v + w$, on aura :

$$S + \Delta S = u + \Delta u + v + \Delta v + w + \Delta w$$
$$\Delta S = \Delta u + \Delta v + \Delta w$$

$$\frac{\Delta S}{\Delta x} = \frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{\Delta w}{\Delta x} \quad \text{et à la limite} \quad S' = u' + v' + w'.$$

III. La dérivée d'une fonction de fonction est le produit des dérivées des fonctions simples qui la composent, prises chacune par rapport à la variable dont la fonction dépend immédiatement.

Définitions : 1° Une fonction est explicite, si la manière dont sont liées la fonction et la variable est connue et définie; elle est implicite dans le cas contraire. Ainsi :

x^4, $\sin x$, $\log\frac{\mathrm{tg}\,x}{(1+x)^2}$, $a\sqrt[x^3]{1+x^2}$ sont des fonctions explicites,

$f(xy) = 0$ est une fonction implicite.

2° Si l'on a $y = f(u)$ et $u = \varphi(x)$, on dit que y est une fonction de fonc-

tion par rapport à la variable x dont y ne dépend que par l'intermédiaire de la fonction u. On comprend maintenant l'énoncé de la proposition III; soit : $y=f(u)$ et $u=\varphi(x)$, on a identiquement $\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{\Delta y}{\Delta u}\cdot\frac{\Delta u}{\Delta x}$, et si l'on passe à la limite $y'_x=y'_u\times u'_x$.

Exemple : soit $y=\log u$ et $u=x^2$, on aura :

$$y'=\frac{\log e}{u}\times 2x=\frac{\log e}{x^2}2x=\frac{2}{x}\log e.$$

Généralisation de cette règle : soit $y=f(u)$ $u=\varphi(v)$ $v=\psi(w)$ $w=\chi(x)$, on aura : $\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{\Delta y}{\Delta u}\cdot\frac{\Delta u}{\Delta v}\cdot\frac{\Delta v}{\Delta w}\cdot\frac{\Delta w}{\Delta v}$ et à la limite $y'_x=f'(u)\times\varphi'(v)\times\psi'(w)\times\chi'(x)$.

IV. La dérivée d'un produit est la somme des produits obtenus en multipliant la dérivée de chaque facteur par l'ensemble de tous les autres facteurs.

$$y=u.v \quad y+\Delta y=(u+\Delta u)(v+\Delta v)=u.v+v\Delta u+u\Delta v+\Delta u.\Delta v$$
$$\frac{\Delta y}{\Delta x}=v\frac{\Delta u}{\Delta x}+u\frac{\Delta v}{\Delta x}+\frac{\Delta u}{\Delta x}\Delta v, \quad \text{et à la limite,} \quad y'=vu'+uv';$$

prenons trois facteurs $y=u.v.w$, on peut considérer uv comme un seul facteur
$$y'=(uv)w'+w(uv)'=uvw'+w(uv'+vu')=uvw'+wuv'+wvu'.$$

V. Dérivée d'un quotient $y=\frac{u}{v}$ $y+\Delta y=\frac{u+\Delta u}{v+\Delta v}$

$$\Delta y=\frac{u+\Delta u}{v+\Delta v}-\frac{u}{v}=\frac{uv+v\Delta u-uv-u\Delta v}{v(v+\Delta v)}=\frac{v\Delta u-u\Delta v}{v(v+\Delta v)};$$

d'où $\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{v\frac{\Delta u}{\Delta x}-u\frac{\Delta v}{\Delta x}}{v(v+\Delta v)}$ et à la limite $y'=\frac{vu'-uv'}{v^2}$, résultat qu'il est facile d'énoncer en langage vulgaire.

V. Dérivée d'une puissance. $y=u^m=u\times u\times u\times\ldots\ldots$, en appliquant la règle de la dérivée d'un produit on a $y'=u'u^{m-1}+u'u^{m-1}+\ldots\ldots$, ou en faisant la somme $y'=mu^{m-1}u'$.

Exemples. Il est bon d'éclaircir par quelques exemples les notions précédentes, et comme il est nécessaire de posséder parfaitement toutes les règles de dérivation, nous engageons le lecteur à se créer une quantité de cas particuliers dont il cherchera lui-même la solution.

$y=x^3(x^2+1)(3x-1)$	$y'=18x^5-5x^4+12x^3-3x^2$
$y=\frac{5x^2-3x+4}{x^2-1}$	$y'=\frac{3x^2-18x+3}{(x^2-1)^2}$
$y=\sqrt{x}=x^{\frac{1}{2}}$	$y'=\frac{1}{2}x^{-\frac{1}{2}}=\frac{1}{2\sqrt{x}}$
$y=\frac{1}{x^2}=x^{-2}$	$y'=-2x^{-3}=-\frac{2}{x^3}$
$y=(a+bx^m)^n$	$y'=n(a+bx^m)^{n-1}\times mbx^{m-1}$.

Dérivées des fonctions circulaires.

I. $$y = \sin x,$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\sin(x+\Delta x) - \sin x}{\Delta x} = \frac{2\sin\frac{\Delta x}{2}\cos\left(x+\frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x} = \frac{\sin\frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}}\cos\left(x+\frac{\Delta x}{2}\right),$$

à la limite, comme un arc indéfiniment petit se confond avec son sinus, il vient

$$y' = \cos x.$$

II. $y = \cos x$ ou bien $y = \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right)$, et, en prenant la dérivée de cette fonction de fonction $y' = \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) \times \left(\frac{\pi}{2} - x\right)' = -\cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = -\sin x.$

III. $$y = \operatorname{tang} x \quad \text{ou} \quad y = \frac{\sin x}{\cos x}, \quad \text{on a :}$$

$$y' = \frac{\cos x(\sin x)' - \sin x(\cos x)'}{\cos^2 x} = \frac{\cos^2 x + \sin^2 x}{\cos^2 x} = \frac{1}{\cos^2 x}.$$

IV. $$y = \operatorname{cotang} x = \frac{\cos x}{\sin x} \qquad y' = -\frac{1}{\sin^2 x}.$$

V. $$y = \text{séc}\, x = \frac{1}{\cos x} \qquad y' = \frac{\sin x}{\cos^2 x}.$$

Dérivées des fonctions circulaires inverses.

I. **Dérivée de** $y = \operatorname{arc\,sin} x$. On déduit de cette équation $x = \sin y$, et, prenant la dérivée des deux membres d'après la règle des fonctions de fonctions, on a : $1 = \cos y \times y'$, d'où $y' = \frac{1}{\cos y} = \frac{1}{\sqrt{1-\sin^2 y}} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

II. **Dérivée de** $y = \operatorname{arc\,cos} x$;

$$\cos y = x \quad -\sin y \times y' = 1 \quad y' = -\frac{1}{\sin y} = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

III. **Dérivée de** $y = \operatorname{arc\,tang} x$

$$\operatorname{tang} y = x, \quad \frac{1}{\cos^2 y} y' = 1, \quad y' = \cos^2 y = \frac{1}{1+\operatorname{tang}^2 y} = \frac{1}{1+x^2}.$$

DE LA VARIATION DES FONCTIONS.

Soit une fonction $y = f(x)$, sa dérivée $f'(x)$ est la limite de $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ quand Δx diminue indéfiniment; donc $\Delta y = \Delta x(f'(x) + \varepsilon)$, ε étant une quantité que l'on peut rendre moindre que toute quantité donnée en prenant Δx assez petit. Or l'accroissement Δx étant positif, $f'(x)$ étant fini, et ε aussi petit que l'on veut, il en résulte que le second membre, et par suite le premier, ont le signe de $f'(x)$. Donc,

si $f'(x)$ est > 0, Δy sera positif et la fonction ira en croissant quand x augmente à partir de la valeur considérée. Si la dérivée est < 0, la fonction décroît.

D'après cela, si la dérivée d'une fonction reste > 0 pour x compris entre x_0 et x_1, la fonction ira sans cesse croissant dans le même intervalle. Ceci subsiste même si la dérivée s'annule dans l'intervalle, pourvu qu'elle ne change pas de signe. On appelle maximum d'une fonction une valeur de cette fonction plus grande que les valeurs voisines, et minimum une valeur plus petite que les valeurs voisines. Parmi les maximum et les minimum, les uns sont relatifs et les autres absolus.

Avant le maximum, la fonction va en croissant, et après, elle va en diminuant, donc sa dérivée passe du positif au négatif. Pour un minimum, la dérivée passe du négatif au positif. Quand il s'agit de fonctions continues, les dérivées sont ordinairement continues et par suite ne changent de signe qu'en passant par zéro. On obtiendra donc les maximum et minimum en cherchant les valeurs de x, qui annulent la dérivée en la faisant changer de signe.

Exemples : 1° On donne $x+y=2a$, trouver le maximum ou le minimum de $x^m+y^m=u$. On a : $u'=mx^{m-1}+my^{m-1}y'$. D'autre part : $x+y=2a$ donne $1+y'=0$, $y'=-1$, d'où $u'=mx^{m-1}-my^{m-1}$, et la dérivée sera nulle pour $x=y$. En étudiant la dérivée u', on voit que lorsque x en croissant passe par la valeur a, la dérivée passe du négatif au positif. C'est donc à un maximum que nous avons à faire, du moins en supposant que m soit > 1.

2° Chercher les valeurs maxima et minima de $y=\dfrac{x^2-5x+6}{x^2+x+1}$. On a $y'=\dfrac{6x^2-10x-11}{(x^2+x+1)^2}$. Le signe de cette dérivée est celui du trinôme $6x^2-10x-11$, trinôme qui est positif quand x est en dehors des racines de l'équation $6x^2-10x-11=0$, et négatif quand x est compris entre les deux racines. Les maximum ou minimum correspondent donc à chacune de ces deux racines.

3° Trouver la variation du volume d'un cylindre circulaire droit dont la surface totale est constante. Si l'on appelle x le rayon de la base et y la hauteur, on aura : $2\pi x^2+2\pi xy=2\pi a^2$ ou (1) $x^2+xy=a^2$, et le volume $V=\pi x^2y=\pi x^2\dfrac{a^2-x^2}{x}=\pi(a^2x-x^3)$, car l'équation (1) donne $y=\dfrac{a^2-x^2}{x}$. Si nous admettons que y doit être > 0, il en résulte que x ne peut varier que de 0 à a; pour ces deux valeurs 0 et a, le volume $\pi(a^2x-x^3)$ est nul, dans l'intervalle il passe donc par un maximum. La dérivée de ce volume égalée à zéro, est : $\pi(a^2-3x^2)=0$. Équation vérifiée pour $x=\dfrac{a}{\sqrt{3}}$. A cette valeur de x, correspond le volume maximum $V=\pi\left(\dfrac{a^3}{\sqrt{3}}-\dfrac{a^3}{3\sqrt{3}}\right)$, et la valeur de y est alors $y=\dfrac{2a}{\sqrt{3}}$, c'est-à-dire que la hauteur est égale au diamètre de la base.

REMARQUE : Deux fonctions qui ont même dérivée ne diffèrent que par une constante.

DÉRIVÉES D'UNE FONCTION DE PLUSIEURS VARIABLES.

Soit $z=f(x.y)$ une fonction de deux variables indépendantes x et y, si dans cette fonction on considère y comme constant et que l'on prenne la dérivée par

rapport à x, on aura la dérivée partielle de la fonction z par rapport à x, soit f'_x. On aura de même f'_y si l'on dérive par rapport à y en supposant x constant.

Exemple : $y^2 - 5xy + 3x^2 + 2y - 3x = z.$

On a : $z'_x = -5y + 6x - 3, \quad z'_y = -5x + 2y + 2.$

DÉRIVÉES DES FONCTIONS COMPOSÉES.

La fonction $y = f(u.v)$ est dite fonction composée lorsque u et v dépendent d'une variable x. On peut écrire :

$$\Delta y = f(u+\Delta u, v+\Delta v) - f(u.v) = f(u+\Delta u, v+\Delta v) - f(u, v+\Delta v) + f(u, v+\Delta v) - f(u.v)$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(u+\Delta u, v+\Delta v) - f(u, v+\Delta v)}{\Delta u} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{f(u.v+\Delta v) - f(u.v)}{\Delta v} \frac{\Delta v}{\Delta x}.$$

Si Δx tend vers zéro, les quantités $\frac{\Delta y}{\Delta x}$, $\frac{\Delta u}{\Delta x}$, $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ tendent vers y', u', v';

$$\frac{f(u.v+\Delta v) - f(u.v)}{\Delta v},$$

tend vers la dérivée partielle f'_v par rapport à v de la fonction $f(u.v)$, puisque c'est le rapport de l'accroissement de cette fonction à l'accroissement de la variable v lorsque la variable u reste constante. De même, le coefficient de $\frac{\Delta u}{\Delta x}$ a pour limite $f'_u(uv)$.

Donc, en résumé, $y' = f'_u(u.v) \times u' + f'_v(u.v) \times v'$.

D'une manière générale, si l'on a $y = f(u.v.w...)$, on calculera la dérivée y' en prenant $f'_u \times u' + f'_v \times v' + f'_w \times w' + ...$

DÉRIVÉE DES FONCTIONS IMPLICITES.

Nous avons déjà dit plus haut ce qu'était une fonction implicite; c'est une fonction liée à la variable par une équation non résolue $f(x.y) = 0$. Si l'on pouvait résoudre l'équation et la mettre sous la forme $y = \varphi(x)$, la fonction deviendrait explicite.

Étant donné $f(xy) = 0$, trouver y'. En appliquant le théorème des fonctions composées que nous venons de démontrer, nous aurons:

$$f'_x + y'f'_y = 0, \quad \text{ou bien} \quad y' = -\frac{f'_x}{f'_y}.$$

DES FONCTIONS PRIMITIVES.

On appelle fonctions primitives d'une fonction donnée celles qui ont pour dérivée cette fonction donnée. Toutes les fonctions primitives d'une fonction diffèrent entre elles seulement par une constante. On conçoit toujours l'existence de pareilles fonctions, mais la recherche en est souvent fort difficile. Il n'y a pour ainsi dire pas de règle générale à suivre : c'est la plus ou moins grande habileté,

la plus ou moins grande expérience de l'opérateur, qui le plus souvent décident du succès et conduisent à des résultats souvent fort remarquables.

Voici la solution dans les cas les plus simples :

La fonction primitive de	Ax^m...	est...	$\frac{Ax^{m+1}}{m+1}$ + une constante B,
id.	$\cos mx$	*id.*	$\frac{\sin mx}{m}+B$,
id.	$\sin mx$	*id.*	$\frac{-\cos mx}{m}+B$,
id.	a^x	*id.*	$\frac{a^x \log e}{\log a}$,

La fonction primitive de	$\operatorname{tang} x$	est...	$-\log\cos x + B$,
id.	$\frac{1}{x}$,	*id.*	$Lx + B$,
id.	$\frac{1}{1+x^2}$	*id.*	arc $\operatorname{tang} x + B$,
id.	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$,	*id.*	arc $\sin x + B$,
id.	$\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}}$,	*id.*	$\sqrt{a^2+x^2}+B$,
id.	$\frac{e^x}{1+e^{2x}}$,	*id.*	arc $\operatorname{tange} + B$.

DÉVELOPPEMENT DES FONCTIONS EN SÉRIES.

Dans un polynôme entier par rapport à x et mis sous la forme

$$f(x) = A_0x^m + A_1x^{m-1} + A_2x^{m-2} \ldots + A_{m-1}x + A_m,$$

on donne à x un accroissement h, et l'on a :

$$f(x+h) = A_0(x+h)^m + A_1(x+h)^{m-1} \ldots + A_{m-1}(x+h)x + A_m$$

ou, en développant, par la formule du binôme et ordonnant par rapport à h comme le montre le tableau suivant :

$A_0x^m + h$	$mA_0x^{m-1} + \frac{h^2}{1.2}$	$m(m-1)A_0x^{m-2} + \ldots \frac{h^{m-1}}{1..2(m-1)}$	$m(m-1)\ldots 2.1A_0x + A_0h^m$
$+ A_1x^{m-1}$	$(m-1)A_1x^{m-2}$	$(m-1)(m-2)A_1x^{m-3}$	
$+ A_2x^{m-2}$	$(m-2)A_2x^{m-3}$		
⋮	⋮	⋮	
$+ A_{m-1}x$	A_{m-1}	A_{m-2}	
$+ A_m$			

Ce qui peut s'écrire :

$$(1)\quad f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{1.2}f''(x) \ldots + \frac{h^{m-1}}{1.2\ldots(m-1)}f^{m-1}(x) + \frac{h^m}{1.2\ldots m}f^m(x);$$

car chaque coefficient de (h) est la dérivée du coefficient précédent, et les coefficients successifs sont les dérivées successives de la fonction $f(x)$. Cette égalité (1) pourrait servir à trouver la dérivée d'un polynôme entier, car elle montre bien que $\frac{f(x+h)-f(x)}{h}$ a pour limite $f'(x)$.

La forme de développement que nous venons de trouver s'applique à une fonction continue quelconque; mais alors la suite se prolonge indéfiniment et constitue une série qui est connue sous le nom de *série de Taylor;* c'est ce que nous allons démontrer.

Supposons que la fonction $f(x)$ et ses $n+1$ premières dérivées restent fixes et continues quand x varie de x_0 à x_0+h, nous pouvons toujours poser :

$$f(x_0+h)=f(x_0)+\frac{h}{1}f'(x_0)+\frac{h^2}{1.2}f''(x_0)+\ldots\ldots\frac{h^n}{1.2\ldots n}f^n(x_0)+\frac{h^{n+1}}{1.2\ldots(n+1)}\mathrm{R},$$

R étant déterminé de façon à ce que cette égalité soit vérifiée.

Posons maintenant $x_1=x_0+h$, d'où $h=x_1-x_0$, l'égalité précédente deviendra :

$$f(x_1)-f(x_0)-\frac{x_1-x_0}{1}f'(x_0)-\frac{(x_1-x_0)^2}{1.2}f''(x_0)\ldots\ldots-\frac{(x_1-x_0)^n}{1.2\ldots n}f^n(x_0)-\frac{(x_1-x_0)^{n+1}}{1.2.3\ldots n+1}\mathrm{R}=0,$$

le nombre R dépendant de x_1 et de x_0. Considérons la fonction $\varphi(x)$ représentée par le premier membre de la série précédente où l'on remplace le nombre constant x_0 par la variable x, excepté dans R, nous aurons :

$$\varphi(x)=f(x_1)-f(x)-\frac{x_1-x}{1}f'(x)-\frac{(x_1-x)^2}{1.2}f''(x)\ldots\ldots-\frac{(x_1-x)^{n+1}}{1.2\ldots(n+1)}\mathrm{R}.$$

Si l'on prend la dérivée $\varphi'(x)$ de cette fonction, on voit que les termes de cette dérivée se détruisent deux à deux, sauf les deux derniers, et l'on a :

$$\varphi'(x)=-\frac{(x_1-x)^n}{1.2\ldots n}f^{n+1}(x)+\frac{(x_1-x)^n}{1.2.3\ldots n}\mathrm{R}=\frac{(x_1-x)^n}{1.2.3\ldots n}\left\{\mathrm{R}-f^{n+1}(x)\right\}\qquad(1)$$

D'après les hypothèses de plus haut, $\varphi(x)$ et $\varphi'(x)$ restent fixes et continues quand x varie de x_0 à x_1; or, pour $x=x_0$, nous avons vu que $\varphi(x)$ est nul, et que pour $x=x_1$, $\varphi(x)$ est encore nul; donc de x_0 à x_1, la fonction $\varphi(x)$ passe par un maximum, par suite la dérivée change de signe en passant par zéro puisqu'elle est finie et continue. La valeur de x, qui annule $\varphi'(x)$ entre x_0 et $x_1=x_0+h$, peut se représenter par $x_0+\theta h$, θ étant <1, et l'on a $\varphi'(x_0+\theta h)=0$, et l'équation (1) donne $\mathrm{R}-f^{n+1}(x_0+\theta h)=0$ ou $\mathrm{R}=f^{n+1}(x_0+\theta h)$. Par suite, il vient :

$$f(x_0+h)=f(x_0)+\frac{h}{1}f'(x_0)+\frac{h^2}{1.2}f''(x_0)+\ldots\ldots+\frac{h^n}{1.2\ldots n}f^n(x_0)+$$
$$+\frac{h^{n+1}}{1.2\ldots n+1}f^{n+1}(x_0+\theta h).$$

Si le dernier terme tend vers zéro lorsque (n) augmente indéfiniment, on a une série convergente.

Dans la série précédente, si nous faisons $x_0=0$, l'accroissement h de x se

alors représenté précisément par x, et nous obtiendrons la série de Mac-Laurin :

$$f(x)=f(o)+\frac{x}{1}f'(o)+\frac{x^2}{1.2}f''(o)\ldots\ldots+\frac{x^n}{1.2\ldots n}f^n(o)+\frac{x^{n+1}}{1.2\ldots n+1}f^{n+1}(0x).$$

Application. Développement de e^x; toutes les dérivées de e^x sont e^x, et pour $x=0$, toutes ces dérivées sont égales à 1, donc

$$e^x=1+\frac{x}{1}+\frac{x^2}{1.2}+\ldots\ldots+\frac{x^n}{1.2\ldots n}+\frac{x^{n+1}}{1.2\ldots(n+1)}e^{\theta x}.$$

Le terme complémentaire tend vers zéro, et la quantité e^x est représentée par la série indéfinie $1+\frac{x}{1}+\frac{x^2}{1.2}+\frac{x^3}{1.2.3}+\frac{x^4}{1.2.3.4}+\ldots\ldots$

Développements de sin x *et* cos x *et de* $L(1+x)$.

$$\sin x=\frac{x}{1}-\frac{x^3}{1.2.3}+\frac{x^5}{1.2.3.4.5}\ldots\ldots-\frac{x^{2n+1}}{1.2\ldots2n+1}+\frac{x^{2n+3}}{1.2\ldots2n+3}+\ldots\ldots$$

$$\cos x=1-\frac{x^2}{1.2}+\frac{x^4}{1.2.3.4}\ldots\ldots\ldots-\frac{x^{2n}}{1.2\ldots2n}+\frac{x^{2n+2}}{1.2\ldots2n+2}-\ldots\ldots\ldots$$

En cherchant les dérivées successives de $L(1+x)$ et y faisant $x=0$, on arrive encore à la série

$$L(1+x)=\frac{x}{1}-\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{3}-\frac{x^4}{4}+\ldots\ldots$$

Il est facile de comprendre, sans plus de détails, qu'à l'aide de cette série convergente dont on peut prendre autant de termes que l'on voudra, on arrivera à calculer la valeur arithmétique des logarithmes népériens. De ces derniers on passe aux logarithmes vulgaires par le module M.

NOTIONS SOMMAIRES SUR LA THÉORIE GÉNÉRALE DES ÉQUATIONS.

Une équation est l'expression d'une égalité qui, n'ayant lieu que pour certaines valeurs des lettres qu'elle renferme, sert à déterminer ces valeurs.

La théorie générale des équations renferme des aperçus ingénieux, des propositions fort remarquables: elle offre un vaste champ d'études au mathématicien, mais on peut dire qu'au point de vue de la pratique de l'art de l'Ingénieur, elle est restée à peu près sans usage. Dans quelques cas où il faut recourir à des équations de degré supérieur au troisième, il existe généralement des méthodes particulières d'arriver à la solution, et souvent il est plus commode de traiter le problème au moyen de courbes que l'on construit par points, comme nous le verrons dans la suite. Nous n'hésiterons donc pas à laisser presque absolument de côté la théorie générale des équations, qui, du reste, pour être de quelque utilité, demanderait à être traitée d'une manière complète et fort étendue.

Nous nous contenterons d'énoncer quelques résultats de cette théorie, résultats qu'on ne saurait ignorer.

ÉQUATIONS NUMÉRIQUES DE DEGRÉ QUELCONQUE.

La forme la plus générale de ces équations est :

$$A_0x^m + A_1x^{m-1} + A_2x^{m-2} + \ldots\ldots + A_{m-1}x + A_m = 0.$$

A_0 A_1 ... A_m sont des coefficients constants; m est le degré de l'équation.

Théorème fondamental. Une équation de degré m, dans laquelle les coefficients sont des nombres donnés réels ou imaginaires, admet toujours précisément m racines réelles ou imaginaires.

Les racines imaginaires sont des nombres de la forme $a + b\sqrt{-1}$ dont nous dirons plus loin quelques mots. Parmi les m racines il peut y en avoir un certain nombre d'égales entre elles, de même que l'on a vu l'équation du deuxième degré avoir deux racines égales lorsque le premier membre de cette équation est un carré parfait.

Si une équation à coefficient réels admet une racine imaginaire de la forme $a + b\sqrt{-1}$, elle admet nécessairement et un même nombre de fois la racine conjuguée $a - b\sqrt{-1}$, ce qu'on peut vérifier sur l'équation du deuxième degré.

Relations entre les coefficients d'une équation et ses racines. Une équation admettant les (m) racines $a.b.c \ldots k$, son premier membre peut se mettre sous la forme

$$(x-a)(x-b)(x-c)\ldots\ldots(x-k) = x^m + A_1x^{m-1} \ldots\ldots + A^{m-1}x + A^m = 0.$$

En développant le produit des m facteurs, cette identité nous montre que

$$\begin{aligned}
A_1 &= -(a+b+c\ldots+k) = -\Sigma a \\
A_2 &= (ab+ac+bc\ldots+gk) = \Sigma ab \\
A_3 &= -(abc+abd\ldots+abk\ldots) = -\Sigma abc. \\
&\vdots \\
A_m &= \pm a.b.c.\ldots k.
\end{aligned}$$

Des racines égales. Si une équation admet n racines égales entre elles, elle peut se mettre sous la forme $(x-a)^n\varphi(x) = 0$, et l'on voit que sa dérivée $n(x-a)^{n-1}\varphi'x) + (x-a)^n\varphi'(x)$, égalée à zéro, admet $n-1$ fois la même racine. D'après cela, si une équation a n racines égales, la $(n-1)^{ième}$ dérivée du premier membre admettra aussi cette racine une fois.

Il est évident que pour avoir les racines égales entre elles dans une équation, il suffit de chercher le plus grand commun diviseur entre le premier membre de l'équation et sa dérivée. Ce plus grand communn diviseur, égalé à zéro, renfermera toutes les racines égales une fois de moins que ne les renferme l'équation donnée.

On pourra le considérer comme le premier membre d'une nouvelle équation dont il s'agira de trouver les racines égales, lesquelles seront les racines triples, quartes, etc., de l'équation primitive. On conçoit bien comment on peut arriver de la sorte, par de longues opérations, à la connaissance des racines égales.

Recherche des racines réelles. La règle des signes de Descartes, les théorèmes de Rolle et de Sturm ont pour but de séparer les racines réelles de l'équation,

c'est-à-dire de trouver une série de nombres tels que dans l'intervalle de l'un à l'autre soit comprise une seule racine de l'équation donnée. On comprend que de la sorte on n'a plus qu'à faire quelques essais numériques pour déterminer une valeur approchée de la racine.

Équations transcendantes. On appelle équations transcendantes celles qui renferment les fonctions trigonométriques, logarithmiques ou exponentielles. Telles sont, par exemple, $e^x \cos mx = 0$ $\mathrm{L}\sin x + a^{\cos x} = 0$. Il est évident qu'ici il n'y a plus à considérer le degré; les premiers membres sont souvent discontinus, et l'on ne peut leur appliquer les théorèmes démontrés pour les équations ordinaires. En général, on cherche à résoudre ces équations par le moyen de courbes plus ou moins faciles à construire, et l'on recourt, par exemple en astronomie, à des procédés particuliers à chaque cas. Nous ne nous y arrêterons pas plus longtemps.

CALCUL DES QUANTITÉS IMAGINAIRES.

Nous avons déjà vu que les équations numériques admettaient des racines dites imaginaires, et qui sont de la forme $a + \sqrt{-B}$, B étant un nombre positif. On peut donc les écrire $a + \sqrt{-b^2}$ ou $a + b\sqrt{-1}$, ou bien $a + bi$.

Deux expressions $a + b\sqrt{-1}$ $a - b\sqrt{-1}$ sont dites conjuguées; du moment que l'une est racine de l'équation, sa conjuguée est aussi racine de cette équation.

Nous avons cherché, en parlant du binôme, le développement de $(a + b\sqrt{-1})^m$ et les puissances successives de $\sqrt{-1}$ ..... qui sont:

$$i^{4n} = 1 \quad i^{4n+1} = \sqrt{-1} \quad i^{4n+2} = -1 \quad i^{4n+3} = -\sqrt{-1}.$$

Les opérations d'addition, de soustraction, de multiplication et de division démontrées pour les quantités réelles s'appliquent aux binômes imaginaires

$$a + b\sqrt{-1} + a' + b'\sqrt{-1} = a + a' + (b + b')\sqrt{-1},$$
$$(a + b\sqrt{-1})(c + d\sqrt{-1}) = ac - bd + (ad + bc)\sqrt{-1},$$
$$(a + b\sqrt{-1})(a - b\sqrt{-1}) = a^2 + b^2.$$

On peut donner aux expressions imaginaires une forme plus commode que $a + b\sqrt{-1}$ en posant $a = \rho\cos\varphi$, $b = \rho\sin\varphi$; d'où $a^2 + b^2 = \rho^2$ et $\mathrm{tang}\,\varphi =$ équations qui donnent les valeurs de ρ et de φ et permettent d'écrire:

$$a + b\sqrt{-1} = \rho(\cos\varphi + \sqrt{-1}\sin\varphi).$$

MULTIPLICATION ET DIVISION DES EXPRESSIONS IMAGINAIRES.

$\rho(\cos\varphi + \sqrt{-1}\sin\varphi) \times \rho'(\cos\varphi' + \sqrt{-1}\sin\varphi')$ est égal à

$$\rho\rho'[\cos\varphi\cos\varphi' - \sin\varphi\sin\varphi' + \sqrt{-1}(\sin\varphi\cos\varphi' + \sin\varphi'\cos\varphi)] =$$
$$= \rho\rho'[\cos(\varphi + \varphi') + \sqrt{-1}\sin(\varphi + \varphi')].$$

De là résulte que $\frac{\rho(\cos\varphi+\sqrt{-1}\sin\varphi)}{\rho'(\cos\varphi'+\sqrt{-1}\sin\varphi')}=\frac{\rho}{\rho'}[\cos(\varphi-\varphi')+\sqrt{-1}\sin(\varphi-\varphi')]$.

La règle du produit permet de passer immédiatement à la règle des puissances d'un nombre imaginaire :

$$[\rho(\cos\varphi+\sqrt{-1}\sin\varphi)]^m=\rho^m(\cos m\varphi+\sqrt{-1}\sin m\varphi).$$

Il est facile d'étendre cette formule au cas où m est fractionnaire et négatif,

$$[\rho(\cos\varphi+\sqrt{-1}\sin\varphi)]^{\frac{m}{n}}=\rho^n\left(\cos\frac{m\varphi}{n}+\sqrt{-1}\sin\frac{m\varphi}{n}\right).$$

PROBLÈME. Exprimer $\cos m\varphi$ en fonction de $\cos\varphi$ et de $\sin\varphi$.

On a $(\cos\varphi+\sqrt{-1}\sin\varphi)^m=\cos m\varphi+\sqrt{-1}\sin m\varphi$, et en développant le premier membre, puis, égalant entre elles les parties réelles et les parties imaginaires,

$$\cos m\varphi=\cos^m\varphi-\frac{m(m-1)}{1.2}\cos^{m-2}\varphi\sin^2\varphi+\frac{m(m-1)(m-2)(m-3)}{1.2.3.4}\cos^{m-4}\varphi\sin^4\varphi\ldots$$

$$\sin m\varphi=m\cos^{m-1}\varphi\sin\varphi-\frac{m(m-1)(m-2)}{1.2.3}\cos^{m-3}\varphi\sin^3\varphi+\ldots$$

C'est ce qui constitue le développement de Moivre.

RÉSOLUTION DES ÉQUATIONS DU 3ᵉ DEGRÉ.

La forme la plus générale des équations du 3ᵉ degré est :

$$x^3+ax^2+bx+c=0.$$

Si dans cette équation nous remplaçons x par $x'+h$, nous pouvons déterminer (h) de manière à annuler le coefficient de x^2 dans l'équation résultante; en effet, $(x'+h)^3+a(x'+h)^2+b(x'+h)+c=x'^3+x'^2(3h+a)+x'(3h^2+2ah+b)+h^3+ah^2+bh+c=0$.

Si l'on pose $3h+a=0$, ou bien $h=-\frac{a}{3}$, nous n'aurons plus qu'à résoudre une équation de la forme

$$x^3+px+q=0.$$

Remarque. Un nombre quelconque admet trois racines cubiques. Soit d'abord l'équation $x^3-1=0$, elle admet d'abord la racine $x=1$, puis deux racines imaginaires données par $\frac{x^3-1}{x-1}=0=x^2+x+1$; ces deux racines sont $\frac{-1\pm\sqrt{-3}}{2}$, quantités imaginaires dont le cube est l'unité; l'un de ces nombres étant représenté par α, l'autre le sera par α^2; car $\left(\frac{-1+\sqrt{-3}}{2}\right)^2=\frac{-1-\sqrt{-3}}{2}$.

D'après cela l'équation $x^3=A$ admet trois racines, x', $x'\alpha$ et $x'\alpha^2$.

Si dans l'équation $x^3+px+q=0$, on remplace x par $y+z$, cette équation deviendra $(1)\ y^3+z^3+(3yz+p)(y+z)+q=0$.

Nous avons évidemment le droit d'établir entre y et z telle relation que nous voudrons, par exemple (2) $3yz+p=0$, et alors (1) devient (3) $y^3+z^3+q=0$. Ce système d'équations (2) et (3) peut s'écrire $y^3z^3=-\left(\frac{p}{3}\right)^3$ et $y^3+z^3=-q$, donc y^3 et z^3 sont les racines de l'équation du 2e degré $u^2+qu-\frac{p^3}{27}=0$, c'est-à-dire

$$-\frac{q}{2}+\sqrt{\frac{q^2}{4}+\frac{p^3}{27}} \quad \text{et} \quad -\frac{q}{2}-\sqrt{\frac{q^2}{4}+\frac{p^3}{27}}.$$

On en déduit $$x=y+z=\sqrt[3]{-\frac{q}{2}+\sqrt{\frac{q^2}{4}+\frac{p^3}{27}}}+\sqrt[3]{-\frac{q}{2}-\sqrt{\frac{q^2}{4}+\frac{p^3}{27}}}.$$

NOTIONS

SUR LES INFINIMENT PETITS, SUR LE CALCUL DIFFÉRENTIEL ET SUR LE CALCUL INTÉGRAL

L'étude à peu près complète que nous avons faite des dérivées nous permettra de glisser rapidement sur le calcul différentiel et le calcul intégral; nous nous contenterons d'en indiquer les principes, sans nous préoccuper des applications aux courbes et aux surfaces, applications qui seront mieux à leur place dans la partie réservée à la géométrie analytique.

DES INFINIMENT PETITS.

On nomme infiniment petit une variable dont la limite est zéro.

Lorsque, dans une question, on doit considérer à la fois plusieurs infiniment petits, on considère ordinairement l'un d'entre eux comme infiniment petit principal, le choix en étant d'ailleurs absolument arbitraire. Ceci posé, on appelle infiniment petit du 1er ordre toute quantité dont le rapport à l'infiniment petit principal a une limite finie, infiniment petit du 2e ordre toute quantité dont le rapport au carré de l'infiniment petit principal a une limite finie, et ainsi de suite...

Soit $\varphi(x)$ une fonction. Si l'on donne à x un accroissement h qui sera l'infiniment petit principal, l'accroissement de la fonction $\varphi(x+h)-\varphi(x)$ sera un infiniment petit du 1er ordre, car nous avons vu que la limite du rapport $\frac{\varphi(x+h)-\varphi(x)}{h}$ a généralement une valeur finie qui est la dérivée de la fonction $\varphi(x)$. Nous verrons en géométrie d'autres exemples d'infiniment petits du 1er ordre et du 2e ordre.

Dans la recherche de la limite d'un rapport ou de la limite d'une somme, on peut remplacer un infiniment petit par un autre dont le rapport au premier ait pour limite l'unité. Exemple : Un arc infiniment petit peut se remplacer par sa corde.

DE LA DIFFÉRENTIELLE.

Si $\varphi(x)$ désigne une fonction de la variable x, on sait que la dérivée $\varphi'(x)$ est la limite de $\frac{\varphi(x+h)-\varphi(x)}{h}$, et que l'on peut écrire

$$\varphi(x+h)-\varphi(x)=h[\varphi'(x)+\varepsilon]=h\varphi'(x)+h\varepsilon,$$

expression dans laquelle $h\alpha$ est infiniment petit par rapport à $h\varphi'(x)$. Il en résulte que, dans tout problème où il s'agit de calculer un rapport ou une somme, on peut remplacer l'accroissement de la fonction par la quantité $h\varphi'(x)$ dont le rapport avec $\varphi(x+h)-\varphi(x)$ a pour limite l'unité. On appelle cette quantité $h\varphi'(x)$ différentielle de la fonction $\varphi(x)$, et on la représente au moyen de la lettre d placée devant la fonction.

Conformément à cette notation, la différentielle de x se confond avec l'accroissement de cette variable, et s'écrit dx. Si l'on a $y=\varphi(x)$, on aura :

$$dy = d.\varphi(x) = \varphi'(x).dx.$$

La différentielle n'est pas rigoureusement égale à l'accroissement de $\varphi(x)$, nous l'avons vu plus haut; mais elle peut le remplacer sans que cela entraîne à aucune erreur dans les limites de sommes ou de rapports.

La différentielle d'une fonction est, d'après ce qui précède, le produit de la dérivée par la différentielle de la variable. Il semble, d'après cela, que l'emploi de la différentielle, identique à celui de la dérivée, ne puisse présenter aucun avantage spécial. Cela est vrai pour la plupart des questions que nous aurons à étudier, aussi ne nous appesantirons-nous point sur l'étude des différentielles; toutefois nous ferons quelques remarques qui montrent souvent un avantage sérieux à la considération des différentielles.

Si y est une fonction de x, x est par la même raison une fonction de y, et rien n'oblige à prendre l'une des deux variables plutôt que l'autre ou que toute fonction de l'une ou de l'autre pour variable principale. Or, l'emploi des dérivées exige absolument que l'on fasse un pareil choix, la dérivée n'ayant de sens déterminé que lorsqu'on indique la variable par rapport à laquelle on dérive. Au contraire, si l'on considère la différentielle de y, $dy=\varphi'(x).dx$, elle fait connaître une relation entre deux quantités dy et dx proportionnelles aux accroissements infiniment petits que l'on peut simultanément attribuer à x et à y. L'une de ces quantités dy et dx est nécessairement arbitraire, mais rien n'indique que ce soit dx plutôt que dy, la relation pouvant aussi bien s'écrire $dx=\frac{1}{\varphi'(x)}.dy$ et donnant sous cette forme la différentielle de x considérée comme fonction de y et correspondant à une valeur arbitraire de dy.

Il y a plus, la différentielle d'une fonction reste la même quelle que soit la variable par rapport à laquelle cette fonction soit exprimée. En effet, soit $x=\psi(u)$ une fonction dans laquelle la lettre u désigne elle-même une fonction de x, $u=\varphi(x)$, la différentielle de y est $dy=\psi'(u)\ \varphi'(x).dx$, ou bien $\psi'(u).du$ en la prenant par rapport à u. Les deux quantités sont identiques pourvu que l'on attribue dans le dernier cas à la différentielle arbitraire du la valeur qui résulte de la définition même lorsque u est regardé comme fonction de x $du=\varphi'(x)\ dx$.

On voit d'après cela que, x, y, u désignant trois variables dont deux peuvent s'exprimer au moyen de l'autre, les relations $du=\varphi'(x).dx$ et $dy=\psi'(u).du$ font connaître trois quantités dx, dy, du dont l'une au choix est arbitraire, et qui sont proportionnelles aux accroissements infiniment petits que peuvent prendre simultanément les trois variables x, y, u.

Différentielle d'une fonction de plusieurs variables.

Soit $z = \varphi(x.y)$, la théorie des dérivées nous a montré que

$$\varphi(x+h,\ y+k) - \varphi(x.y) = h\,\varphi'_x(x.y) + k\,\varphi'_y(x.y),$$

ce qui avec les notations des différentielles se transforme en :

$$d.\varphi(xy) = \frac{d\varphi}{dx}\,dx + \frac{d\varphi}{dy}.\,dy.$$

Il est évident que dans le second nombre, les numérateurs $d\varphi$ des fonctions $\frac{d\varphi}{dx}$, $\frac{d\varphi}{dy}$ ont des significations différentes, puisque ces deux fonctions sont les dérivées partielles de φ, et que pour la première on suppose y constant et pour la seconde au contraire on suppose x constant.

Dérivée d'une fonction composée $y = f(u.v)$.

Appliquant à cette dérivée que nous connaissons la notation différentielle, il vient :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{df}{du}\cdot\frac{du}{dx} + \frac{df}{dv}\cdot\frac{dv}{dx}.$$

Dérivée ou différentielle d'une fonction implicite $\varphi(x.y) = 0$.

On a : $\varphi'_x + y' \times \varphi'_y = 0$, ce qui peut s'écrire $\frac{d\varphi}{dx} + \frac{dy}{dx}\cdot\frac{d\varphi}{dy} = 0$,

ou bien
$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\left(\frac{d\varphi}{dx}\right)}{\left(\frac{d\varphi}{dy}\right)}.$$

Dérivées et différentielles de divers ordres.

Si l'on considère une fonction $y = \varphi(x)$, la différentielle dy est par définition $dy = \varphi'(x).dx$, en sorte que y dépend à la fois de x et de la quantité arbitraire dx, différentielle que nous regardons comme une constante; dy devient alors une fonction de x qui peut être différentiée. La différentielle de dy se nomme différentielle seconde de y; en la désignant par d^2y et nommant $\varphi''(x)$ la dérivée de $\varphi'(x)$, on a évidemment $d^2y = \varphi''(x).dx^2$. Regardant encore dx comme constante, nous pouvons différentier d^2y, et il viendra $d^3y = \varphi'''(x).dx^3$, et en général $d^ny = \varphi^n(x).dx^n$. Les fonctions $\varphi'(x)\,\varphi''(x)\ldots\varphi^n(x)$ sont les dérivées successives de $\varphi(x)$, et l'expression d'une dérivée quelconque en fonction de la différentielle correspondante se trouve dans le tableau suivant :

$$\varphi'(x) = \frac{dy}{dx} \quad \varphi''(x) = \frac{d^2y}{dx^2} \quad \varphi'''(x) = \frac{d^3y}{dx^3} \ldots \varphi^n(x) = \frac{d^ny}{dx^n}.$$

DU CALCUL INTÉGRAL.

Le calcul intégral est l'inverse du calcul différentiel; le but qu'on s'y propose est de remonter de la différentielle d'une fonction ou, plus généralement, d'une propriété de cette différentielle à la connaissance de la fonction elle-même.

C'est l'opération que nous connaissons déjà sous le nom de recherche des fonctions primitives; et les cas où l'on est parvenu à résoudre la question sont encore bien peu nombreux. La fonction primitive d'une différentielle se désigne par le signe $\int$, corruption de l'initiale du mot somme; ainsi $\int \varphi(x).dx$ désigne d'une manière générale toute fonction dont $\varphi(x)dx$ est la différentielle. Nous reproduirons ici quelques intégrales tellement simples, qu'on les trouve immédiatement à la simple inspection de leur différentielle, pourvu qu'on ait quelque habitude du calcul :

$$\int x^m dx = \frac{x^{m+1}}{m+1} + C \qquad \int \frac{dx}{x} = L.x + C$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{la} + C \qquad \int \cos x\,dx = \sin x + C$$

$$\int \operatorname{tang} x\,.\,dx = \int \frac{\sin x}{\cos x} dx = -l\cos x + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \operatorname{arc}\sin x + C$$

$$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arc}\operatorname{tang} x + C$$

$$\int \frac{(x+1)dx}{\sqrt{1-x^2}} = \int \frac{x\,dx}{\sqrt{1-x^2}} + \int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = -\sqrt{1-x^2} + \operatorname{arc}\sin x + C$$

$$\int \cos^2 x\,.\,dx = \int \frac{(1+\cos 2x)dx}{2} = \int \frac{dx}{2} + \frac{1}{4}\int \cos 2x\,.\,d2x = \frac{x}{2} + \frac{1}{4}\sin 2x.$$

Intégration par partie.

La règle de la dérivée d'un produit permet d'écrire $d(u.v) = u.dv + v.du$; on en conclut, en intégrant les deux membres, $uv = \int udv + \int vdu$, et par conséquent

$$\int udv = uv - \int .v.du.$$

Si donc on peut intégrer la différentielle vdu, on saura, par cela même, intégrer udv puisque la formule précédente donnera immédiatement cette intégrale. D'après cela, une expression différentielle étant donnée, on la partagera, pour l'intégrer, en deux facteurs dont l'un soit choisi de manière à ce que l'on sache l'intégrer; en nommant u le premier facteur et dv le second, la formule précédente nous donnera l'expression de l'intégrale cherchée, qui sera ramenée à l'intégrale nouvelle $\int vdu$. L'habileté du calculateur consiste à choisir les deux facteurs de la différentielle proposée, de telle sorte que l'opération simplifie autant que possible le résultat.

EXEMPLE : Trouver $\int x^3 lx\,dx$, posons $x^3dx = d.\frac{x^4}{4} = dv$ et $lx = u$, on aura :

$$\int x^3 l\,dx = \frac{x^4}{4}lx - \int \frac{x^4}{4}.\frac{dx}{x} = \frac{x^4}{4}lx - \frac{x^4}{16} + C.$$

Intégrales définies.

Nous avons vu qu'à toute intégrale il fallait ajouter une constante arbitraire,

de façon à comprendre dans une seule formule toutes les fonctions primitives de la différentielle donnée. Les intégrales que nous avons trouvées jusqu'ici sont donc des intégrales non définies ou indéfinies. Si l'on veut déterminer complétement une intégrale, il faut lui imposer une condition qui permette de déterminer la constante, et l'on se trouve alors en présence d'une intégrale dite définie. Par exemple, si l'on veut que l'intégrale trouvée $F(x) + C$ s'annule pour une valeur (a) de la variable, on posera $F(a) + C = 0$, d'où $C = -F(a)$, et l'intégrale définie cherchée sera $F(x) - F(a)$, que l'on indique généralement par la notation suivante :

$$\int_a^x \varphi(x)\,dx = F(x) - F(a).$$

Les quantités a et x se nomment les deux limites de l'intégration.

Il n'est nullement nécessaire que la limite supérieure que nous désignons par x soit une variable; elle peut recevoir une valeur numérique quelconque, la définition n'exige évidemment qu'une seule chose, c'est que la fonction $F(x)$ varie d'une manière continue entre les limites a et x, qui peuvent être des nombres arbitrairement choisis; il faut, par exemple, que dans l'intervalle cette fonction ne devienne pas infinie.

Nous terminerons ici la partie théorique du calcul intégral, remettant à la géométrie analytique les applications géométriques de ce calcul.

QUELQUES NOTIONS DU CALCUL DES PROBABILITÉS.

La probabilité d'un fait est une fraction dont le dénominateur est le nombre de toutes les chances également possibles, parmi lesquelles est compris le fait considéré, et le numérateur est le nombre des chances favorables à l'événement dont il s'agit. Si le fait est impossible, la probabilité est nulle; s'il est certain, la probabilité est l'unité. Elle peut prendre toutes les valeurs possibles entre 0 et 1.

On admet comme une notion primitive celle de l'égalité de deux probabilités, c'est-à-dire que chacun comprend ce que l'on veut dire en affirmant que deux probabilités sont égales entre elles.

Lorsqu'un événement est composé, c'est-à-dire lorsqu'il résulte du concours de deux événements simples qui doivent avoir lieu en même temps, sa probabilité est le produit de celles qui correspondent aux deux événement simples. En effet, soient deux urnes renfermant, la première $m+n$ boules dont m blanches et n noires, la deuxième $m' + n'$ boules dont m' blanches et n' noires. Si l'on tire une boule de chaque urne, le nombre des combinaisons possibles est évidemment $(m + n)\,(m'+n')$, et celui des combinaisons favorables à la sortie de deux boules blanches est mm'; la probabilité est donc

$$\frac{mm'}{(m+n)(m'+n')} = \frac{m}{m+n} \cdot \frac{m'}{m'+n'},$$

ce qui prouve la proposition énoncée.

Théorème de Bernouilli.

Le théorème de Bernouilli sert de fondement à toutes les recherches statistiques; il consiste en ce que la répétition indéfinie des événements, que l'on regarde comme fortuits, fait disparaître ce qu'ils ont de variable, de telle sorte que dans une série d'un nombre immense de faits, qui ne semblent régis que par le hasard, il ne subsiste plus que les rapports constants et nécessaires qui résultent de leurs probabilités respectives.

Par exemple, si une urne renferme un million de boules blanches et un million de boules noires, il est extrêmement probable qu'après un grand nombre d'épreuves on aura tiré autant de boules blanches que de boules noires, et l'on peut toujours assez augmenter le nombre des épreuves pour que cette probabilité approche de la certitude d'aussi près qu'on le voudra.

Tables de mortalité. Si l'on considère le mouvement de la population d'un pays pendant un nombre d'années peu considérable, on peut, sans erreur sensible, le regarder comme uniforme, et regarder comme constant le nombre des naissances annuelles et le nombre des décès survenus à chaque âge. D'après cela, les registres de l'état civil permettent de former une table indiquant, pour un nombre donné d'individus nés dans la même année, combien il en reste encore après un nombre connu d'années; cette table, dite *Table de mortalité*, permet de calculer toutes les probabilités relatives à la vie humaine; mais il faut bien se dire que ces tables ne s'appliquent qu'à une grande collection d'individus et non pas à un seul homme soumis à tant d'influences variables.

Vie probable. La vie probable à un âge donné est le nombre d'années après lequel on a autant de chances de vivre que d'être mort; pour la déterminer, il suffit de voir à quelle époque le nombre des individus de l'âge considéré sera réduit de moitié.

Vie moyenne. La vie moyenne, à partir d'un âge donné, est le nombre d'années qu'un individu de cet âge aurait encore à vivre, si le nombre total des années de vie se répartissait également entre tous les individus de l'âge considéré. La vie moyenne se calcule sans peine au moyen des tables de mortalité; on peut encore l'avoir au moyen du théorème suivant :

« La vie moyenne, à partir de la naissance, est égale à la population divisée par le nombre des naissances annuelles. » Il faut admettre une population constante. Si N est le nombre des naissances et que parmi ses N enfants il y en ait v_1 qui meurent dans la première année, v_2 dans la seconde, v_3 dans la troisième, v_{100} dans la centième, je dis que la vie moyenne est représentée par

$$\frac{v_1 + 2v_2 + 3v_3 \ldots + 100v_{100}}{N}.$$

En effet, car le nombre total des années vécues par le groupe de ces N individus se compose du nombre des individus qui ne vivent qu'un an, plus deux fois le nombre des individus qui vivent deux ans, plus trois fois le nombre des individus qui vivent trois ans, plus cent fois...

Or, le numérateur de la fraction précédente représente la population, car elle se compose du nombre v_1 des individus qui naissent et qui meurent dans l'année, du nombre v_2 de l'année actuelle, plus le nombre v_2 d'individus de l'année précédente qui ne sont pas morts, soit $2v_2$, du nombre v_3 de l'année actuelle, plus

les v_3 individus de chacune des deux années précédentes et qui ne sont pas encore morts, soit $3v_3$...; de sorte que la population P est bien égale à

$$v_1 + 2v_2 + 3v_3 + \ldots + 100v_{100} + \ldots,$$

et la vie moyenne se représente par $\frac{P}{N}$.

Rentes viagères. Un individu d'un certain âge dépose un capital à une compagnie qui lui assure une certaine rente jusqu'au jour de sa mort; après sa mort, le capital appartient à la compagnie. Ou bien encore, un individu s'engage à donner à une compagnie une certaine somme annuelle pendant n années, à l'expiration desquelles la compagnie donnera à l'individu un certain capital.

Pour calculer la rente viagère à faire par la compagnie dans le premier cas, par l'individu dans le second cas, on suppose que tous les individus du même âge s'assurent à la fois, et l'on calcule, d'après le chiffre connu des décès successifs, combien le banquier devra recevoir et combien il devra payer; en égalant ces deux sommes, on obtient la valeur de la pension à payer si l'avantage devait être égal de chaque côté. Avec de pareilles bases, une compagnie qui aurait affaire à beaucoup d'individus serait certaine de n'avoir que très-peu perdu ou très-peu gagné après un long temps; mais il est évident que les compagnies modifieront les résultats du calcul, de telle façon qu'avec ce système d'assurances, ce qu'il y ait de mieux assuré, ce soit leur propre bénéfice.

GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE.

La géométrie analytique s'occupe de la représentation des figures au moyen de symboles algériques.

GÉOMÉTRIE PLANE.

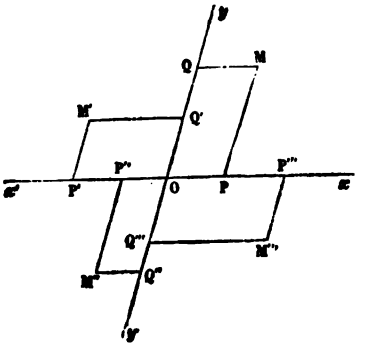
CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

La position d'un point dans un plan se détermine au moyen de deux quantités qu'on appelle les coordonnées du point.

Le nombre des systèmes de coordonnées est infini, car un point est donné par l'intersection de deux lignes variables, et l'on peut choisir tel système de lignes que l'on voudra.

Le système le plus commun est celui des coordonnées rectilignes :

Fig. 1.



Soient deux droites xx', yy' se coupant sous un angle quelconque; d'un point donné M on mène des parallèles à ces droites xx', yy' que l'on appelle axes de coordonnées, et l'on forme ainsi un parallélogramme $MQOP$. Il est clair que le point M sera facile à déterminer si l'on nous donne les deux quantités OP, OQ, car on construira le parallélogramme dont le quatrième sommet sera le point M. Les deux longueurs OP et OQ sont les coordonnées du point M; OP est l'abscisse et OQ l'ordonnée.

Afin de pouvoir représenter tous les points de l'espace, nous donnerons un signe aux coordonnées, les x ou abscisses seront positifs sur ox et négatifs sur ox', les y ou ordonnées seront positifs sur oy et négatifs sur oy'. De la sorte, tous les points du plan sont compris dans quatre régions qui sont les angles des deux axes, et un point

du 1er angle	xoy	a pour coordonn.	une abscisse	positive et une ordonn.	positive,
du 2e	yox'	*id.*	négative	*id.*	positive,
du 3e	$x'oy'$	*id.*	négative	*id.*	négative,
du 4e	$y'ox$	*id.*	positive	*id.*	négative.

Il est évident que deux coordonnées étant données, on connaît immédiatement par leur signe à quel angle appartient le point qu'elles représentent, et inversement un point étant donné, la position de ce point indique immédiatement le signe de ses coordonnées.

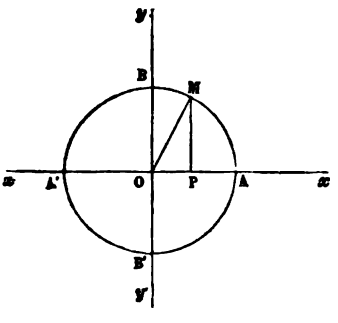
Généralement, les deux axes de coordonnées sont perpendiculaires entre eux, et l'on opère alors avec un système de coordonnées rectilignes rectangulaires.

Un point peut encore être déterminé par ses distances à deux points fixes; c'est un système peu employé, car le point ne se trouve pas complétement déterminé, les deux coordonnées pouvant s'appliquer aussi bien à ce point qu'à son symétrique par rapport à la ligne joignant les deux points fixes.

Le second système usuel est le système de coordonnées polaires dont nous dirons plus loin quelques mots.

Mais revenons au système des coordonnées rectilignes et montrons comment dans ce système les lignes planes sont représentées par des équations.

Fig. 2.



Soit une ligne plane quelconque ABA'B', traçons dans son plan deux axes ox et oy, et soient x et y ou OP et MP l'abscisse et l'ordonnée d'un point M de la ligne donnée; quand le point M se meut sur la ligne, les deux coordonnées varient simultanément, et si l'on prend une valeur quelconque OP pour l'abscisse, l'ordonnée MP est déterminée, puisqu'il suffit, pour l'avoir, de mener une parallèle du point P à l'axe de y. Ainsi y est fonction de x, et la nature de la fonction dépend de la nature de la ligne. Dans le cas actuel, la figure représente un cercle, et les axes de coordonnées sont deux diamètres rectangulaires entre eux, le triangle rectangle MOP donne la relation $y^2+x^2=R^2$, et y est une fonction de x que l'on peut mettre sous la forme $y=\sqrt{R^2-x^2}$.

Réciproquement, si l'on donne une équation $f(xy)=0$ entre deux variables, chaque couple de valeurs réelles de x et y vérifiant cette équation détermine un point x_0, y_0; et si, à partir d'une valeur déterminée x_0, x va en croissant de quantités infiniment petites, y variera de même d'une façon continue en passant d'une valeur à l'autre, et sera en général réelle tant que x sera compris dans de certaines limites. Il en résulte que la série de points déterminée par les valeurs successives de x et y formera une ligne continue. L'équation $f(x.y)=0$ peut donc se représenter par une courbe.

D'après cela, on peut se poser deux questions différentes : 1° Étant donnée une ligne définie géométriquement, trouver l'équation de cette ligne; 2° étant donné une équation, construire la ligne qu'elle représente et trouver les propriétés de cette ligne.

Tels sont les deux problèmes que nous nous proposons d'étudier sommairement.

Homogénéité.

Quelques mots d'abord sur l'homogénéité des formules en géométrie :

Une fonction F $(a.b.c...)$ de plusieurs quantités est dite homogène par rapport à ces quantités lorsque, en remplaçant $a.b.c...$ par $ka, kb, kc...$, la nouvelle fonction F $(ka, kb, kc)...$ est égale à $k^m \times$ F $(a.b.c...)$

Ainsi la fonction $a^2 + b^2 + c^2$ est homogène par rapport à $a.b.c$ et du degré 2; car le nombre m exprime le degré.

De même $\frac{ab}{c} - \sqrt{dc}$ est homogène et du degré 1,

$\sqrt{a} - \sqrt{b}$ *id.* *id.* $\frac{1}{2}$.

Une fonction peut être homogène par rapport à plusieurs des quantités qu'elle renferme et ne l'être pas par rapport aux autres. Ex.: $a^2 + nb^2$ est homogène par rapport à a et b, mais ne l'est pas par rapport à a, n, b.

Une équation $f(a.b.c...) = 0$ est homogène quand son premier membre est homogène.

Les équations que l'on obtient en géométrie sont nécessairement homogènes par rapport aux lettres qui représentent des grandeurs de même espèce, pourvu que l'unité à laquelle on rapporte ces grandeurs, reste indéterminée, et c'est ce qui arrive le plus souvent. Ainsi, le théorème du carré de l'hypoténuse donne lieu à une équation homogène de degré 2, $a^2 + b^2 = c^2$.

En général, dans les relations géométriques, on n'a guère à considérer que des longueurs, puisqu'on ramène à des longueurs la considération des volumes et des surfaces, et la loi de l'homogénéité peut s'énoncer comme il suit :

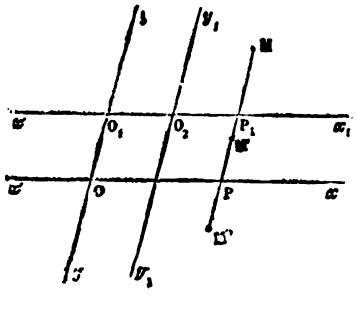
Toute équation qui exprime une propriété d'après laquelle plusieurs longueurs sont liées entre elles est homogène par rapport aux lettres qui représentent les longueurs tant que l'unité demeure indéterminée.

Si une équation géométrique n'est pas homogène parce que l'on a pris l'une des lettres comme unité, il est facile de rétablir l'homogénéité, car si l'on appelle a la longueur prise pour unité, il suffira de poser les relations $\frac{1}{a} = \frac{b'}{b} = \frac{c'}{c}...$ et de remplacer dans l'équation b' par $\frac{b}{a}$, c' par $\frac{c}{a}$, et de suite.

Transformation des coordonnées rectilignes.

Il est souvent utile de changer d'axes de coordonnées, par exemple de rapporter un cercle à deux diamètres rectangulaires quand il est rapporté à deux lignes quelconques du plan. Nous nous proposerons d'établir les formules donnant les valeurs des nouvelles coordonnées par rapport aux anciennes quand on passe d'un système d'axes à un autre.

Fig. 3.



1° Changement d'origine.

Soient deux axes Ox et Oy, on suppose que l'origine est transportée en O_2, c'est-à-dire que les deux axes se transportent parallèlement à eux-mêmes, de manière à venir en O_2x_1 O_2y_1 et on demande quelles seront les nouvelles coordonnées x_1y_1 du point M en fonction des anciennes coordonnées xy du point M et a, b du point O_2.

Il est évident que l'on a :

$$x = x_1 + a \quad y = y_1 + b,$$

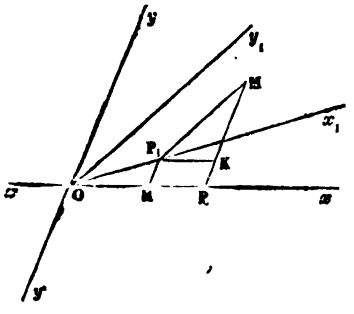
et ces formules sont générales pourvu qu'on donne à a et b le signe convenable. On en déduit

$$x_1 = x - a \quad y_1 = y - b.$$

2° Changement de direction des axes.

On conserve la même origine. Soient θ l'angle yox des anciens axes entre eux, α et α' les angles des nouveaux axes ox_1 et oy_1 avec l'ancien axe ox; pour un point M, on a $OP = x$ $MP = y$ $OP_1 = x_1$ $MP_1 = y_1$.

Fig. 4.



Menons P_1K et P_1H parallèles à Ox et à Oy; on aura :

$$OP = OH + HP = OH + P_1K = x,$$

$$MP = MK + PK = P_1H + MK = y.$$

Le triangle OP_1H donne

$$\frac{OH}{OP_1} \quad \text{ou} \quad \frac{OH}{x_1} = \frac{\text{Sin } OP_1H}{\text{Sin } OHP_1} = \frac{\text{Sin } (\theta - \alpha)}{\text{Sin } \theta},$$

$$\text{et} \quad \frac{P_1H}{OP_1} \quad \text{ou} \quad \frac{P_1H}{x_1} = \frac{\text{Sin } \alpha}{\text{Sin } \theta};$$

on tire de là

$$OH = \frac{x_1 \text{ Sin } (\theta - \alpha)}{\text{Sin } \theta} \quad \text{et} \quad P_1H = \frac{x_1 \text{ Sin } \alpha}{\text{Sin } \theta}.$$

Le triangle MP_1K donnera de même $P_1K = \frac{y_1 \text{ Sin } (\theta - \alpha')}{\text{Sin } \theta}$ et $MK = \frac{y_1 \text{ Sin } \alpha'}{\text{Sin } \theta}$,

et par suite $x = \frac{x_1 \text{ Sin } (\theta - \alpha) + y_1 \text{ Sin } (\theta - \alpha')}{\text{Sin } \theta}$ $y = \frac{x_1 \text{ Sin } \alpha + y_1 \text{ Sin } \alpha'}{\text{Sin } \theta}$.

Ces formules sont générales, ainsi qu'on peut le vérifier en étudiant toutes les dispositions relatives des deux systèmes d'axes yox, $y'ox'$.

3° Si l'on change à la fois et l'origine et la direction des axes, il est évident qu'il suffit d'ajouter les deux résultats précédents et les formules générales de transformation seront

$$x = a + \frac{x_1 \text{ Sin } (\theta - \alpha) + y_1 \text{ Sin } (\theta - \alpha')}{\text{Sin } \theta} \quad y = b + \frac{x_1 \text{ Sin } \alpha + y_1 \text{ Sin } \alpha'}{\text{Sin } \theta},$$

équations d'où l'on peut déduire x_1 et y_1 si l'on connaît x et y.

Cas particulier des coordonnées rectangulaires.

On a $\theta = 90°$ $\text{Sin } \theta = 1$, et les formules générales de transformation deviennent

$$x = a + x_1 \cos \alpha + y_1 \text{ Cos } \alpha' \quad y = b + x_1 \text{ Sin } \alpha + y_1 \text{ Sin } \alpha'.$$

CLASSIFICATION DES LIGNES ALGÉBRIQUES.

Nous avons fait en algèbre la distinction des équations algébriques pures et des équations transcendantes, on distingue aussi les lignes représentées par ces équations en algébriques et transcendantes.

Les lignes algébriques peuvent toujours se mettre sous forme entière puisqu'il suffit de chasser les dénominateurs de tous les termes. Le degré de l'équation ainsi obtenue représente le degré de la ligne.

Le degré d'une ligne ne change pas avec les axes de coordonnées, puisque les relations qui permettent de passer d'une coordonnée à une autre sont du premier degré.

Le degré d'une ligne représente le nombre maximum de points d'intersection de cette ligne avec une droite. En effet, soit $f(x \cdot y) = 0$, une équation de degré m, et soit une droite donnée; on peut toujours prendre cette droite pour un axe des x par exemple, et l'équation devient $F(xy) = 0$; si l'on veut avoir l'intersection de la courbe avec l'axe des x, il suffit évidemment de faire $y = o$, et l'équation $F(x \cdot o) = o$ a pour racines les abscisses des points d'intersection; l'équation étant au plus du degré m, elle a donc au plus m racines, par suite il y a au plus m points d'intersection. On distingue les points d'intersection en points réels simples ou multiples et en points imaginaires suivant qu'ils correspondent à des racines réelles simples ou multiples ou à des racines imaginaires.

D'après cela, les lignes du premier degré ne pouvant être coupées qu'en un point, par une droite, sont des lignes droites. Les lignes du deuxième degré sont rencontrées par une droite en deux points réels ou imaginaires.

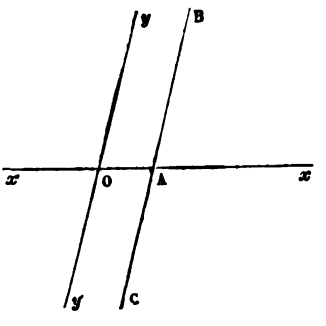
LIGNE DROITE.

Construction de l'équation du premier degré.

L'équation la plus générale du premier degré à deux variables est de la forme $Ax + By + C = o$. Elle représente une ligne droite, comme nous l'avons vu plus haut. Cherchons à construire cette droite :

1° L'un des coefficients des variables est nul, A par exemple, l'équation déduite est $By + C = o$, qui peut se mettre sous la forme $y = -\frac{C}{B}$; donc tous les points dont l'ordonnée y sera constante et égale à $-\frac{C}{B}$ appartiendront à la ligne cherchée qui par suite est une parallèle à l'axe des x.

Fig. 5.



Si B était nul au lieu de A, l'équation $Ax + C = o$ serait satisfaite pour $x = -\frac{C}{A}$ et représenterait une parallèle à l'axe des y.

2° Supposons que le terme constant C soit nul, l'équation $Ax + By = o$ peut alors se mettre sous la forme $y = -\frac{A}{B}x$ ou bien $y = ax$, ou encore $\frac{y}{x} = a$, c'est-à-dire que le rapport de l'ordonnée à l'abscisse est constant. Il est évident que l'équation représente une droite passant par l'origine, et, si (a) est positif les deux

ordonnées y et x sont toujours de même signe, donc la droite est dans les angles yox $y'ox'$, tandis que si a est négatif, y et x sont toujours de signes contraires, donc la droite est dans les angles yox' $y'ox$.

Fig. 6.

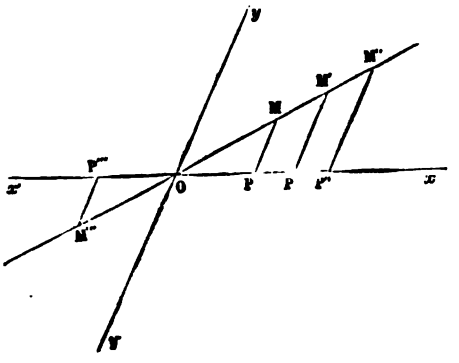
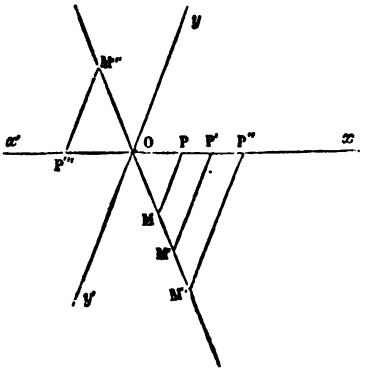


Fig. 7.



3° Enfin dans le cas où l'équation du premier degré a sa forme la plus générale $Ax + By + C = o$, elle peut se mettre sous la forme $y = -\frac{A}{B}x - \frac{C}{B}$ ou bien $y = ax + b$. Si maintenant l'on compare les deux équations $y = ax + b$ et $y = ax$, on voit que les ordonnées correspondantes à une même abscisse diffèrent d'une quantité constante b; on augmentera donc ou l'on diminuera, suivant le signe de b, les ordonnées de la droite OM de quantités égales à la valeur absolue de b, et il est évident qu'on obtiendra de la sorte une droite parallèle à OM, ainsi que le montrent les figures ci-jointes.

Fig. 8.

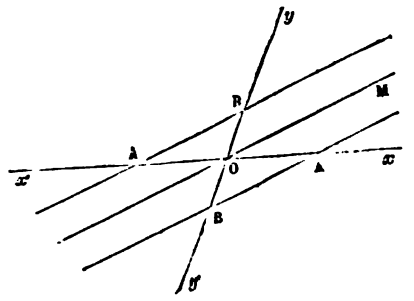
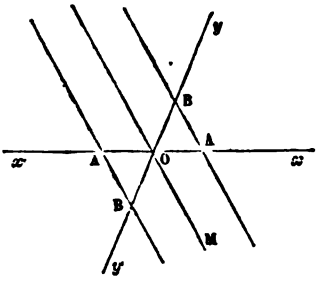


Fig. 9.



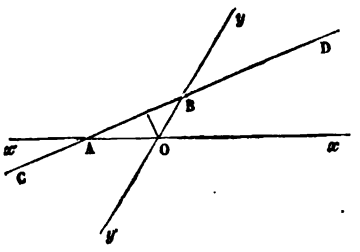
Donc toute équation du premier degré entre deux variables représente une ligne droite. Il est facile de voir que, réciproquement, une droite étant donnée, ainsi que deux axes de coordonnées, la droite peut être représentée par une équation du premier degré $y = ax + b$.

Signification des coefficients.

Si dans l'équation d'une droite mise sous la forme $y = ax + b$, on fait $x = o$, on a $y = b$, on voit donc que la quantité constante b est égale à l'ordonnée à l'origine.

Si, de plus, on considère la droite $y = ax$ parallèle à la droite donnée et passant à l'origine, on voit que la quantité (a) est la même pour toutes les droites parallèles, elle ne dépend que de la direction, et c'est l'élément qu'on appelle coefficient angulaire de la droite.

Fig. 10.



Dans le cas où il s'agit d'axes rectangulaires, le coefficient angulaire $a = \frac{y}{x}$ est évidemment égal à la tangente de l'angle de la droite avec l'axe des x et l'on a

$$a = \text{tang } \alpha.$$

PROBLÈMES.

L'équation d'une droite $y = ax + b$ renferme deux quantités ou paramètres arbitraires. Il faut donc, pour déterminer une droite, deux équations, c'est-à-dire deux conditions géométriques distinctes. Exemples :

1° Si l'on veut exprimer qu'une droite $y = ax + b$ passe par un point donné M', il suffira d'écrire $y' = ax' + b$. Cette relation permet de déterminer b, et en retranchant les deux équations $y = ax + b$ et $y' = ax' + b$ membre à membre, on trouve $y - y' = a(x - x')$, ce qui représente l'équation générale des droites passant par un point donné.

2° Si l'on veut que la droite contienne deux points donnés $x'y'$, $x''y''$, on sait qu'une droite passant par $x'y'$ est de la forme $y - y' = a(x - x')$, et il suffira d'exprimer, pour déterminer a, que cette équation est vérifiée si l'on remplace x et y par x'' et y''. On aura donc $y'' - y' = a(x'' - x')$ ou bien $a = \frac{y'' - y'}{x'' - x'}$, et l'équation de la droite passant par les deux points donnés sera

$$y - y' = \frac{y'' - y'}{x'' - x'}(x - x').$$

3° Par un point donné, mener une parallèle à une droite donnée.

Puisque la direction est donnée, le coefficient angulaire a l'est aussi, et la droite cherchée est représentée par l'équation $y - y' = a(x - x')$.

Distance de deux points $x'y'$ $x''y''$.

Si les axes sont rectangulaires, on a dans le triangle rectangle M'M''K

$$\overline{M'M''}^2 = (x' - x'')^2 + (y' - y'')^2 = d^2.$$

Fig. 11.

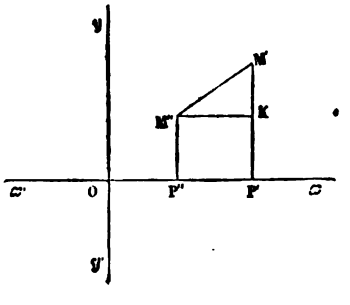
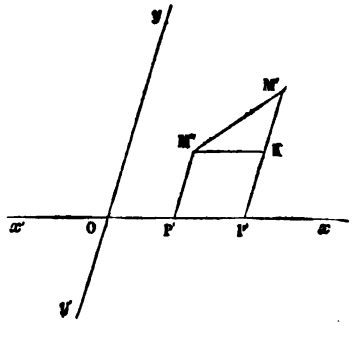


Fig. 12.



Si les axes sont obliques, et que θ soit l'angle yox de ces axes, on a un triangle dont il faut calculer un côté opposé à un angle donné, les deux côtés qui comprennent cet angle étant connus; la formule fondamentale de trigonométrie nous donne alors $\overline{M'M''}^2 = \overline{M''K}^2 + \overline{M'K}^2 - 2M''K \times M'K \times \text{Cos } M''KM'$,

ou bien $$d^2 = (x'-x'')^2 + (y'-y'')^2 + 2(x'-x'')(y'-y'')\text{ Cos }\theta.$$

Intersection de deux droites.

Il s'agit de résoudre le système d'équation $y = ax+b$ $y = a'x+b'$; on en tire immédiatement la solution $x = \dfrac{b'-b}{a-a'}$ et $y = \dfrac{ab'-ba'}{a-a'}$.

Si $a = a'$, on voit que l'intersection s'en va à l'infini et en effet les deux droites sont parallèles.

L'équation générale des droites qui passent par le point d'intersection de deux droites données $Ax+By+C=0$, $A'x+B'y+C'=0$, est de la forme $Ax+By+C+\lambda(A'x+B'y+C')=0$, λ étant un paramètre variable qui sera déterminé si l'on impose à la droite une seconde condition.

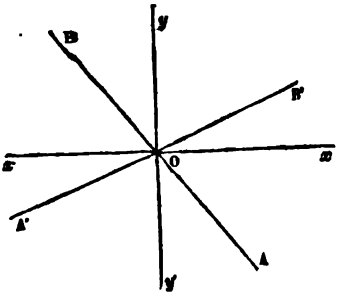
Angle de deux droites.

L'angle de deux droites est le même que celui de leurs parallèles, menées dès l'origine. Il suffit donc de calculer l'angle des droites $y=ax$ et $y'=a'x$.

Soit BOB'=V l'angle de ces deux droites AB, A'B' et soient α et α' les angles BOx, $B'Ox$, on aura : $V=\alpha-\alpha'$, et si l'on veut recourir aux formules trigonométriques $\text{tang } V = \dfrac{\text{tang}\,\alpha - \text{tang}\,\alpha'}{1+\text{tang}\,\alpha\,\text{tang}\,\alpha'}$, ce qui peut s'écrire d'après une remarque que nous avons faite plus haut

$$\text{tang } V = \frac{a-a'}{1+aa'}.$$

Fig. 13.



L'angle V sera droit, si sa tangente est infinie, c'est-à-dire si $1+aa'=0$, ce qui donne $a' = -\dfrac{1}{a}$.

Equation de la perpendiculaire menée par un point à une droite donnée.

Soit $x'y'$ le point donné et $y=ax+b$ la droite donnée; l'équation d'une droite passant par $x'y'$ est de la forme $y-y'=a'(x-x')$ et si cette droite est perpendiculaire à la première, on aura $1+aa'=0$; la droite cherchée a donc pour équation $y-y' = -\dfrac{1}{a}(x-x')$.

Distance d'un point à une droite.

Si $y=ax+b$ est la droite et $x'y'$ le point, la perpendiculaire abaissée du point sur la droite est $y-y' = -\dfrac{1}{a}(x-x')$. Le pied de la perpendiculaire est l'intersection xy de ces deux droites, et la distance $d = \sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}$.

Or l'équation $y=ax+b$ peut s'écrire $y-y'=a(x-x')-(y'-ax'-b)$, ce qui permet d'éliminer $y-y'$ entre les deux équations à résoudre.

On déduit de là :

$$x-x' = \frac{a(y'-ax'-b)}{1+a^2} \text{ et } y-y' = -\frac{y'-ax'-b}{1+a^2},$$

Et en définitive

$$d = \sqrt{(x-x')^2 \times (y-y')^2} = \sqrt{\frac{(y'-ax'-b)^2(1+a^2)}{(1+a^2)^2}} = \frac{y'-ax'-b}{\sqrt{1+a^2}}.$$

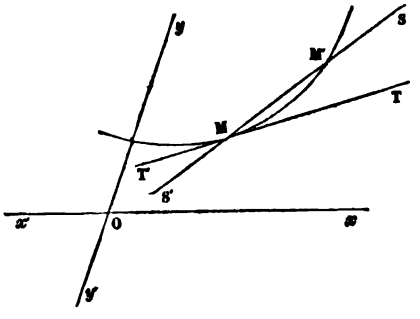
On prendra pour le radical un signe tel que la distance soit positive; on voit que la distance d'un point à une droite est, à un facteur constant près, égale au premier membre de l'équation de la droite $y-ax-b=0$ dans lequel on remplace x et y par les coordonnées du point donné.

THÉORIE DES TANGENTES.

La tangente en un point M d'une courbe est la limite des positions d'une droite passant par M et par un point voisin de la courbe lorsque ce dernier point se rapproche indéfiniment du point M.

On voit d'après cela qu'un point de tangence représente deux points d'intersection; la tangente à une courbe du 2e degré ne rencontre pas cette courbe en d'autre point que le point de tangence; la tangente à une courbe du 3e degré coupe la courbe en un point et la touche en un autre, ce qui représente en tout trois points d'intersection.

Fig. 14.



Si x et y sont les coordonnées du point de contact M, et $x+h, y+k$ les coordonnées du point voisin M', la sécante MM' a pour coefficient angulaire $\alpha = \frac{(y+k)-y}{(x+h)-x} = \frac{k}{h}$ et, quand la sécante devient tangente, α est la limite du rapport de l'accroissement de la fonction à l'accroissement de la variable, $\frac{k}{h}$ se confond avec $\frac{dy}{dx}$ ou encore avec la dérivée de y par rapport à x.

Si l'équation de la courbe est sous la forme explicite $y=f(x)$, la tangente au point x_0y_0 aura pour coefficient angulaire $f'(x_0)$.

Si l'équation de la courbe est sous une forme implicite $f(x.y)=0$, on obtient la dérivée y' de la fonction au moyen de l'équation $f'_x + y'f'_y = 0$, qui donne $y' = -\frac{f'_x}{f'_y}$, et l'équation de la tangente au point x_0y_0 est $\frac{y-y_0}{x-x_0} = -\frac{f'_{x_0}}{f'_{y_0}}$ qui peut s'écrire $(y-y_0)f'_{y_0} + (x-x_0)f'_{x_0} = 0$.

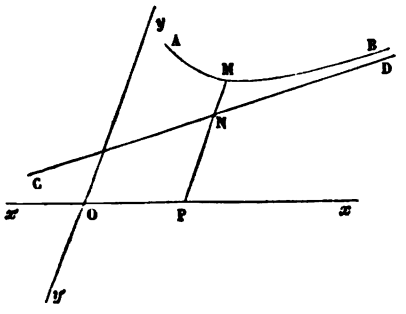
ASYMPTOTES.

Lorsqu'une courbe a une branche infinie AB, il peut arriver que la distance d'un point M de cette branche à une droite fixe CD aille en diminuant indéfiniment à mesure que l'on s'éloigne du point M; on dit alors que la ligne CD est asymptote de la courbe.

Pour que la distance du point M à la droite CD tende vers zéro, il suffit évidemment d'exprimer que la portion d'ordonnée MN tend vers zéro (on sous-entend le cas où l'asymptote est parallèle à l'axe des y).

La droite CD est de la forme $y = ax + b$, et les points de la courbe pourront se représenter par la formule (1) $y = ax + b + \varphi(x)$, $\varphi(x)$ étant une fonction qui s'annule pour $x = \infty$; de cette équation (1) on tire $a = \frac{y}{x} - \frac{b + \varphi(x)}{x}$ et $b = y - ax - \varphi(x)$, et si l'on passe à la limite, c'est-à-dire si l'on fait $x = \infty$, on voit que le coefficient angulaire de l'asymptote est donné par $a = \lim\left(\frac{y}{x}\right)$, et l'ordonnée à l'origine par $b = \lim(y - ax)$.

Fig. 15.



Les asymptotes parallèles à l'axe des y sont des lignes telles que y soit infini pour une valeur finie de x ; généralement on pourra mettre l'équation de la courbe sous une forme telle que les valeurs α, α_1, ... de x pour lesquelles y est infini, se trouvent presque en évidence, et les droites $x = \alpha$, $x = \alpha_1$, ... seront asymptotes de la courbe donnée.

Calcul des asymptotes pour les courbes algébriques.

1° Asymptotes parallèles à l'axe des y.

On ordonne l'équation par rapport à y de manière à la mettre sous la forme

$$y^n\varphi(x) + y^{n-1}\psi(x) + y^{n-2}\chi(x) + \ldots = 0,$$

ce qui peut s'écrire

$$\varphi(x) + \frac{1}{y}\quad \psi(x) + \frac{1}{y^2}\quad \chi(x) + \ldots = 0.$$

On voit que si y est infini pour une valeur finie de x, tous les termes autres que le premier s'annuleront, et l'équation se réduira à $\varphi(x) = 0$.

Donc, s'il y a des asymptotes parallèles à l'axe des y, elles seront données par les racines de l'équation $\varphi(x) = 0$, $\varphi(x)$ étant le coefficient de la plus forte puissance de y dans l'équation.

Pour avoir les asymptotes parallèles à l'axe des x, il faudrait inversement égaler à zéro le plus haut coefficient de x dans l'équation de la courbe.

2° Asymptotes quelconques.

Considérons maintenant une courbe $F(x.y) = 0$, et réunissons ensemble tous les termes de degré m que nous appellerons $\varphi(x.y)$, tous les termes de degré $m - 1$ que nous appellerons $\psi(x.y)$; et ainsi de suite, l'équation de la courbe s'écrira

$$(1) \qquad F(x.y) = \varphi(x.y) + \psi(x.y) + \chi(x.y) \ldots = 0.$$

Soit k le rapport $\frac{y}{x}$, remplaçons dans l'équation (1) y par kx ; les polynomes $\varphi(xy)$, $\psi(xy)$, $\chi(xy)$, ..., étant homogènes et de degrés m, $m - 1$, ..., pourront s'écrire

$$x^m.\varphi(1.k),\quad x^{m-1}\psi(1.k),\quad x^{m-2}\chi(1.k) \ldots,$$

et finalement en divisant l'équation (1) par x^m, on aura :

$$\varphi(1,k)+\frac{1}{x}\psi(1,k)+\frac{1}{x^2}\chi(1,k)+\ldots=0. \tag{2}$$

Lorsque x augmente indéfiniment, et qu'il y a pour k une valeur finie, on voit que l'équation précédente ne conservera plus que son premier terme et deviendra $\varphi(1,k)=0$.

Soit a une racine réelle de cette équation, posons $y-ax=v$; la quantité $\frac{y}{x}$ que nous avons appelée k pourra se remplacer par $a+\frac{v}{x}$, et si dans l'équation (2) nous remplaçons k par cette valeur, il viendra en développant chaque terme par la série de Taylor [et écrivant tout simplement $\varphi(k)$ au lieu de $\varphi(1,k)$]:

$$\left.\begin{aligned}&\varphi(a)+\varphi'(a)\frac{v}{x}+\varphi''(a)\frac{v^2}{x^2}\frac{1}{1.2}+\varphi'''(a)\frac{v^3}{x^3}\frac{1}{123}\cdots\\&+\psi(a)\frac{1}{x}+\psi'(a)\frac{v}{x^2}+\psi''(a)\frac{v^2}{x^3}\frac{1}{1.2}\\&+\chi(a)\frac{1}{x^2}+\ldots\end{aligned}\right\}=0.$$

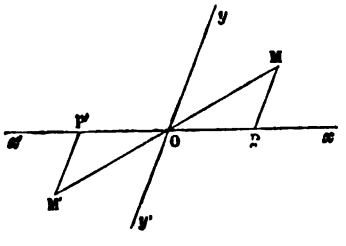
Mais nous savons que $\varphi(a)$ est nul, et si nous multiplions tous les autres termes par x, nous aurons

$$v\varphi'(a)+\psi(a)+M\frac{1}{x}+N\frac{1}{x^2}+\ldots=0,$$

et l'on voit qu'à la limite lorsque x est infini la quantité v ou l'ordonnée à l'origine b de l'asymptote est donnée par la formule $v=-\frac{\psi(a)}{\varphi'(a)}$.

Centre d'une courbe. Le centre d'une courbe est un point qui divise en deux parties égales toutes les cordes qui y passent. Si l'origine est centre de la courbe, et que M en soit un point, que l'on joigne OM et qu'on prolonge cette droite d'une quantité OM'=OM, le point M' sera par définition un autre point de la courbe. Or ce point M' a des coordonnées égales en valeur absolue à celles de M ou de signe contraire. Donc, pour que l'origine soit centre d'une courbe donnée, il faut et il suffit que l'équation ne change pas quand on change x en $-x$ et y en $-y$. La réciproque de cette proposition est vraie.

Fig. 16

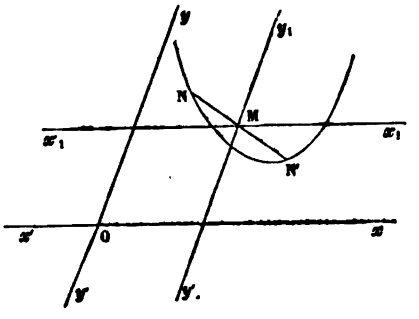


D'après cela, dans une équation algébrique, il faut que tous les termes soient de degré pair ou tous de degré impair, afin que l'équation ne change pas quand on change x en $-x$ et y en $-y$.

Diamètre d'une courbe. Un diamètre d'une courbe est une ligne qui partage en deux parties égales toutes les cordes parallèles à une direction donnée.

Soit une courbe $f(x.y) = 0$, et $y = mx$ la parallèle aux cordes considérées menée par l'origine. Si NN' est une de ces cordes et M son milieu, que l'on transporte les axes parallèlement à eux-mêmes au point M, en nommant x', y' les coordonnées de ce point, l'équation de la courbe viendra $f(x+x', y+y') = 0$, et la corde NN' sera précisément représentée par $y = mx$. Les intersections de la courbe et de la droite ont pour abscisses les racines de $f(x+x', mx+y') = 0$, équation qui devra avoir deux racines égales et de signe contraire x et $-x$.

Fig. 17.



Appliquons aux courbes du second degré, dont l'équation générale est

$$f(x.y) = Ay^2 + Bxy + Cx^2 + Dy + Ex + F = 0.$$

En développant le calcul, on verra que l'équation $f(x+x', mx+y') = 0$ a pour coefficient du terme en x le polynôme $(2Am + B)y' + (Bm + 2C)x' + Dm + E$. Or pour que l'équation du 2e degré $f(x+x', mx+y) = 0$ ait deux racines égales et de signe contraire, il faut qu'elle soit de la forme $Mx^2 + P = 0$, c'est-à-dire que le coefficient de x soit nul. La relation qui existe entre les coordonnées $x'y'$ du point M, milieu de la corde, est donc

$$(2Am + B)y' + (Bm + 2C)x' + Dm + E = 0,$$

et, si l'on supprime les accents, on aura l'expression du diamètre des cordes parallèles à la direction $y = mx$. Ce diamètre est une ligne droite.

Cette équation des diamètres des courbes du second degré peut se mettre sous la forme

$$(2Ay + Bx + D)m + By + 2Cx + E = 0 = mf'_y + f'_x.$$

COURBES DU SECOND DEGRÉ.

CONSTRUCTION DES LIGNES DU SECOND DEGRÉ

L'équation générale du second degré à deux variables est

$$Ay^2 + Bxy + Cx^2 + Dy + Ex + F = 0. \quad (1)$$

Supposons que A ne soit pas nul, nous pourrons résoudre cette équation par rapport à y et la mettre sous la forme

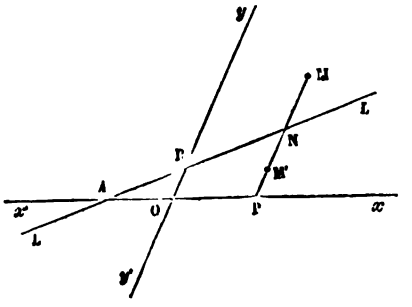
$$y = -\frac{Bx + D}{2A} \pm \frac{1}{2A}\sqrt{(B^2 - 4AC)x^2 + 2(BD - 2AE)x + D^2 - 4AF},$$

ou bien pour abréger, en posant $M = B^2 - 4AC$, $N = BD - 2AE$, $P = D^2 - 4AF$,

$$y = -\frac{Bx + D}{2A} \pm \frac{1}{2A}\sqrt{Mx^2 + 2Nx + P}.$$

Construisons d'abord la droite représentée par l'équation $y = -\frac{Bx + D}{2A}$,

Fig. 18.



et soit LL' cette droite. Pour chaque valeur de x, il faudra, afin de trouver les points de la courbe, porter de part et d'autre du point N sur l'ordonnée une longueur égale à

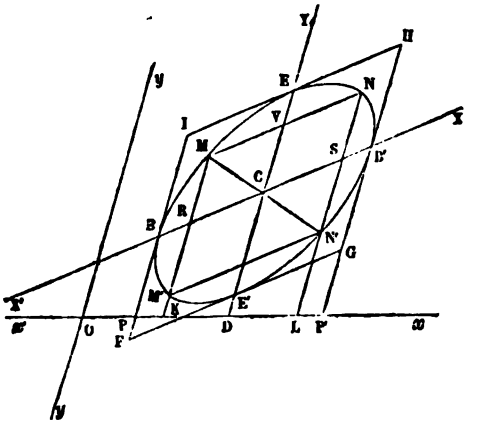
$$Y = \frac{1}{2A}\sqrt{Mx^2 + 2Nx + P}.$$

On voit d'après cela que la ligne LL' est un diamètre, et que l'étude de la courbe est ramenée à l'étude du trinôme $Mx^2 + 2Nx + P$.

1° *Genre ellipse.* Supposons M ou $B^2 - 4AC < 0$. Le trinôme peut avoir ses racines réelles et inégales ou imaginaires.

Si les racines sont réelles et inégales (c'est le cas où $N^2 - MP$ est > 0), appelons les racines x' et x'', et soit x' la plus petite. Construisons le diamètre XX' qui a pour équation $y = -\frac{Bx + D}{2A}$; le radical pouvant se mettre sous la forme $Y = \frac{1}{2A}\sqrt{M(x - x')(x - x'')}$, s'annule pour $x = x'$ et $x = x''$, c'est donc précisément à ces deux abscisses x' et x'' que correspondent les points d'intersection du diamètre avec la courbe, et les ordonnées BP, B'P' n'ayant chacune avec la courbe qu'un point commun seront tangentes à la courbe.

Fig. 19.



Ceci posé, l'ordonnée Y peut s'écrire $Y = \frac{1}{2A}\sqrt{-M(x - x')(x'' - x)}$, $-M$ étant > 0, et cette forme montre que Y sera réel tant que x sera compris entre x' et x''. Ainsi, la courbe est entièrement comprise entre les ordonnées BP, B'P'. D'autre part, des deux facteurs $x - x'$, $x'' - x$ vont l'un en croissant, l'autre en décroissant, leur somme est constante, le maximum a donc lieu pour $x - x' = x - x''$, ou pour $x = \frac{x' + x''}{2}$. C'est donc au milieu C du diamètre BB' que correspondent les ordonnées Y maxima.

Si l'on prend pour x deux valeurs $x' + \alpha$ et $x'' - \alpha$, ces abscisses correspondent aux points R et S également distants du milieu C du diamètre, ils donnent des valeurs égales pour Y, la figure MNM'N' est donc un parallélogramme, dont le centre est le point C. Ce point C partage la corde MN' en deux parties égales, c'est donc le centre de la courbe. Il résulte de la discussion que la courbe est une figure fermée inscrite dans le parallélogramme IIIGF. La corde MN parallèle au diamètre BB' est partagée en deux parties égales par l'ordonnée EE' qui

se trouve être aussi un diamètre de la courbe : les deux diamètres BB', EE', dont chacun partage en deux parties égales les cordes parallèles à l'autre, sont dits diamètres conjugués. Le point C est le centre de la courbe.

Si le trinôme a ses deux racines égales, la valeur de Y deviendra $Y=\frac{1}{2A}\sqrt{M(x-x')^2}$, quantité imaginaire, et la courbe se réduira à un point donné par les deux équations $x-x'=0$ et $y=-\frac{Bx+D}{2A}$.

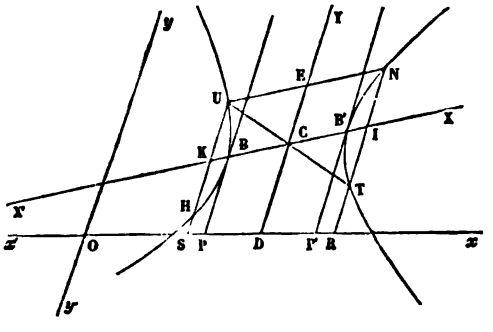
On dit alors que l'ellipse est réduite à un point qui est à la fois et la courbe et son centre.

Si le trinôme a ses racines imaginaires, M étant négatif, le trinôme sous-radical est toujours négatif et l'on est en présence d'une ellipse imaginaire.

2° *Genre hyperbole* ($B^2-4AC>0$). Si $B^2-4AC>0$, nous aurons encore trois cas à considérer, suivant que le trinôme $Mx^2+2Nx+P$ aura des racines réelles et inégales, égales, ou imaginaires, c'est-à-dire suivant que N^2-MP sera >0, $=0$ ou <0.

Si les deux racines x' et x'' sont réelles et inégales, on construira XX' diamètre de la courbe, et l'on aura sur chaque ordonnée à porter de chaque côté du diamètre l'ordonnée

Fig. 20.

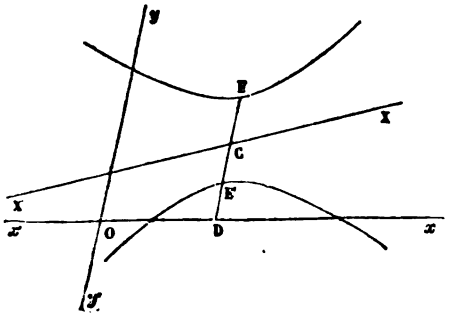


$$Y=\frac{1}{2A}\sqrt{Mx^2+2Nx+P}=$$
$$=\frac{1}{2A}\sqrt{M(x-x')(x-x'')}.$$

M étant positif, la quantité sous-radicale sera positive si les deux facteurs $x-x'$, $x-x''$ sont de même signe, ce qui exige que x soit inférieur à x' ou supérieur à x''. Il n'y a donc pas de point de la courbe entre B et B'. A mesure qu'on s'éloigne à gauche de B ou à droite de B', les facteurs $x-x'$, $x-x''$ augmentent indéfiniment et l'on a deux parties de courbe à branches infinies. On verra comme pour l'ellipse que le point C est centre de la courbe, et que les lignes XX', ED sont deux diamètres conjugués.

Si le trinôme sous-radical a ses deux racines égales à x', la valeur de l'ordonnée de la courbe devient

Fig. 21.



$$y=-\frac{Bx+D}{2A}\pm\frac{\sqrt{M}}{2A}(x-x'),$$

et la courbe se réduit à deux droites se coupant au point C qui a pour abscisse x'.

Si le trinôme sous-radical a ses racines imaginaires, il est toujours du signe du coefficient M, c'est-à-dire positif. La valeur de Y est

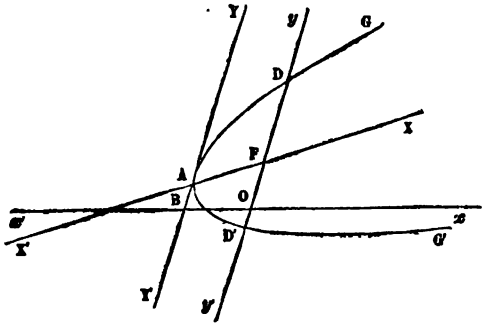
$$Y=\frac{1}{2A}\sqrt{M\left(x+\frac{N}{M}\right)^2+\frac{MP-N^2}{M}},$$

elle ne s'annule jamais, et acquiert sa valeur minima quand $x+\frac{N}{M}=0$, ou $x=-\frac{N}{M}$. Cette abscisse correspond au point D; on voit que XX′ est toujours un diamètre de la courbe, EE′ son diamètre conjugué, C le centre, et que cette courbe a deux branches infinies.

3° *Genre parabole* $(B^2-4AC=0)$.

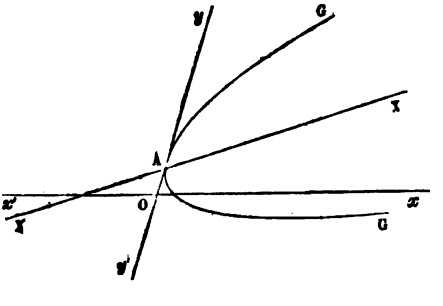
Construisons toujours le diamètre XX′ dont l'équation est $y=-\frac{Bx+D}{2A}$, et l'ordonnée complémentaire $Y=\frac{1}{2}\sqrt{2Nx+P}$. Supposons d'abord N positif; si l'on fait croître x de $-\infty$ à $-\frac{P}{2N}$, Y est imaginaire et aucun point de la courbe ne correspond à ces abscisses; mais si x varie de $-\frac{P}{2N}$ à $+\infty$, Y est réel et va croissant indéfiniment. A partir du point du diamètre XX′ qui a pour abscisse $-\frac{P}{2N}$, la courbe se compose de deux branches infinies qui constituent la parabole. On voit que l'axe des y rencontre la courbe en deux points D et D′, dont les ordonnées sont $Y=\pm\frac{\sqrt{P}}{2A}$. Si P est nul, les deux points D, D′ viennent se confondre avec A et la courbe est tangente à l'axe des y.

Fig. 22.



Lorsque N est <0, on obtient la figure inverse du cas où N est >0, c'est-à-dire que la courbe présente deux branches infinies du côté des x négatifs au lieu de les présenter du côté des x positifs. Enfin lorsque N est nul, $Y=\frac{1}{2A}\sqrt{P}$, c'est-à-dire que l'ordonnée complémentaire est constante, et par suite la courbe se compose de deux droites parallèles au diamètre XX′.

Fig. 23.



4° Nous avons, dans toute cette discussion, laissé de côté le cas où le coefficient A de y^2 est nul. Si A est nul, B^2-4AC ne peut évidemment être <0, il faut donc que B^2-4AC soit positif ou nul, ce qui revient à dire que B n'est pas nul, alors B^2 est positif, ou que B est nul et B^2 l'est aussi.

Si B diffère de zéro, l'équation de la courbe se met sous la forme

$$Bxy + Cx^2 + Dy + Ex + F = 0;$$

or cette équation est du premier degré par rapport à y et donne :

$$y = -\frac{Cx^2 + Ex + F}{Bx + D}.$$

En divisant le numérateur par le dénominateur, nous trouverons évidemment

$$y = Mx + N + \frac{R}{Bx + D},$$

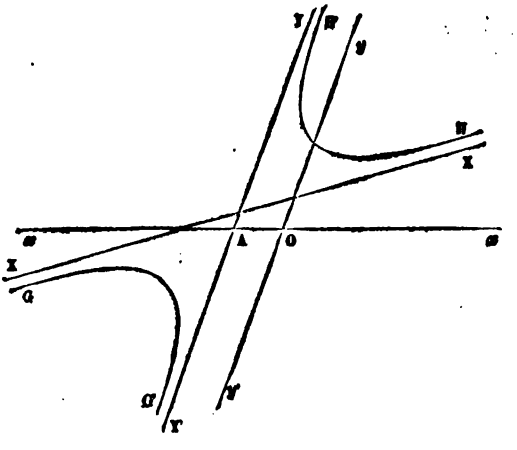
et si nous construisons la droite $y = Mx + N$ représentée par XX', l'ordonnée complémentaire à porter sur chaque ordonnée à partir de la droite XX' sera :

$$Y = \frac{R}{Bx + D},$$

c'est la fonction qu'il faut étudier.

Supposons R, B, D positifs et faisons croître x de $-\infty$ à $-\frac{D}{B}$, Y reste né-

Fig. 24.



gatif et décroit de zéro à $-\infty$, valeur que y atteint pour le point A, dont l'abscisse est $-\frac{D}{B}$. Si x continue à croître de $-\frac{D}{B}$ à $+\infty$, Y varie de $+\infty$ à zéro. Il résulte de là que la droite XX' est une asymptote de la courbe, et l'ordonnée passant au point A, dont l'abscisse est $-\frac{D}{B}$, est une autre asymptote de la courbe.

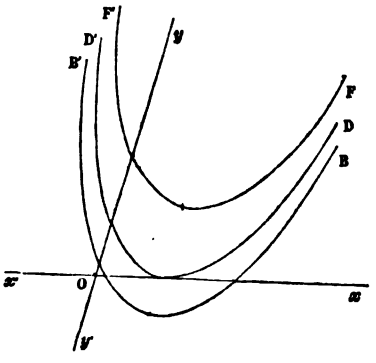
Si maintenant on suppose $A = 0$ et $B^2 - 4AC = 0$, c'est que $B = 0$; l'équation devient $Cx^2 + Dy + Ex + F = 0$; et comme D ne saurait être nul, sans quoi la courbe se réduirait à deux points puisque y n'y existerait plus, on pourra tirer de cette équation :

$$y = -\frac{C}{D}\left(x^2 + \frac{E}{C}x + \frac{F}{C}\right).$$

Admettons que le coefficient $-\frac{D}{C}$ est positif, nous aurons trois cas à étudier :

1° Le trinôme entre parenthèses a deux racines réelles et inégales x' et x'', alors $y=-\frac{C}{D}(x-x')(x-x'')$. Si x croît de $-\infty$ à x', y décroît de $+\infty$ à zéro. Si x croît de x' à x'', y part de zéro pour revenir à zéro en restant négatif dans l'intervalle et prend un maximum en valeur absolue correspondant à l'abscisse $\frac{x'+x''}{2}$. On obtient alors la courbe BB'.

Fig. 25.



2° Le trinôme entre parenthèses a deux racines égales, $y=-\frac{C}{D}(x-x')^2$, x variant de $-\infty$ x', y décroît de $+\infty$ à zéro, et x variant de x' à $+\infty$, y croît de zéro à $+\infty$. La courbe est tangente au point x' à l'axe des abscisses.

3° Le trinôme entre parenthèses a ses racines imaginaires, $y=-\frac{C}{D}[(x-\alpha)^2+\beta^2]$, x variant de $-\infty$ à α, y décroît de $+\infty$ à $-\frac{C\beta^2}{D}$, et x variant de α à $+\infty$, y croît de $-\frac{C\beta^2}{D}$ à $+\infty$. Dans les trois cas, la courbe est une parabole.

Ainsi, d'une manière générale, si B^2-4AC est négatif, la courbe est une courbe fermée appelée ellipse; si $B^2-4AC>0$, la courbe se compose de deux parties formées chacune de deux branches infinies et s'appelle hyperbole; si $B^2-4AC=0$, la courbe se compose d'une seule partie à deux branches infinies, et l'on se trouve en face d'une parabole. Comme cas particulier de l'ellipse, on peut avoir un point ou une ellipse imaginaire; comme cas particulier de l'hyperbole, on peut avoir deux droites qui se coupent; comme cas particulier de la parabole, on peut avoir deux droites parallèles. Ces quelques mots résument complétement la discussion de l'équation générale du second degré à deux variables.

Exemples d'équations à discuter :

$$\begin{cases} 4y^2-12xy+17x^2+8y-28x-20=0, \\ y^2-2xy-x^2+x=0, \\ x^2-3y+5x+4=0. \end{cases}$$

Centre des courbes du second degré. — Soit l'équation

$$Ay^2+Bxy+Cx^2+Dy+Ex+F=0, \tag{1}$$

supposons que cette courbe ait un centre $x'y'$, et transportons les axes des coordonnées parallèlement à eux-mêmes de façon que l'origine coïncide avec le centre. Dans l'équation (1), il faudra pour avoir la nouvelle équation remplacer x par $x+x'$ et y par $y+y'$, et l'on aura alors :

$$Ay^2+Bxy+Cx^2+(2Ay'+Bx'+D)y+(By'+2Cx'+E)x+Ay'^2+Bx'y'+Cx'^2+Dy'+Ex'+F=0.$$

Si $x'y'$ est le centre, il faut que l'équation ne change pas quand on change x en $-x$ et y en $-y$, et pour cela il faut, et il suffit que les coefficients de y et de x soient nuls, ce qui donne pour déterminer les coordonnées du centre les deux équations du 1er degré

$$2Ay' + Bx' + D = 0, \quad By' + 2Cx' + E = 0,$$

d'où l'on tire :

$$x' = \frac{2AE - BD}{B^2 - 4AC}, \quad y = \frac{2CD - BE}{B^2 - 4AC}.$$

Pour l'ellipse et l'hyperbole, $B^2 - 4AC$ diffère de zéro et la courbe a un centre unique. Pour la parabole, il n'y a pas de centre ou l'on peut dire que le centre est à l'infini.

Diamètres des courbes du second degré. — Nous avons vu que pour les courbes du second degré $f(x.y) = 0$, les diamètres se mettaient sous la forme $mf'_y + f'_x = 0$, m est le coefficient angulaire des cordes correspondant au diamètre. L'équation générale des diamètres est donc

$$(1) \qquad (2Ay + Bx + D)m + By + 2Cx + E = 0.$$

Les cordes parallèles à l'axe des x ou à l'axe des y, ont des diamètres qui s'obtiennent en faisant $m = 0$ ou $m = \infty$ dans l'équation (1), leurs équations sont donc :

$$2Ay + Bx + D = 0, \quad \text{et} \quad By + 2Cx + E = 0,$$

et, si l'on cherche le point d'intersection de ces deux diamètres, on voit, d'après les équations du paragraphe précédent, que c'est précisément le centre. Ainsi, tous les diamètres passent par le centre. Dans la parabole, pour laquelle le centre est à l'infini, tous les diamètres sont parallèles.

Les diamètres conjugués sont tels que chacun d'eux divise en deux parties les cordes parallèles à l'autre; il est évident que la parabole n'a point de diamètres conjugués puisque tous ses diamètres sont parallèles. Le coefficient angulaire m' des diamètres donnés par l'équation (1) est, en mettant cette équation sous la forme $y = ax + b$, $m' = -\frac{Bm + 2C}{2Am + B}$, or le coefficient m des cordes sera précisément le coefficient angulaire du diamètre conjugué du premier; il y a donc entre les coefficients angulaires de deux diamètres conjugués la relation

$$(2) \qquad 2Amm' + B(m + m') + 2C = 0.$$

Les axes sont les diamètres perpendiculaires à leurs cordes; les axes sont des diamètres conjugués. En admettant que les axes des coordonnées soient rectangulaires, si les deux axes de la courbe ont pour coefficients angulaires m et m', comme ces axes sont perpendiculaires entre eux, on aura $m = -\frac{1}{m}$, ou $mm' = -1$: or l'équation (2) n'en existe pas moins et elle donnera $m + m' = 2\frac{A - C}{B}$, ainsi m et m' sont les racines de l'équation du second degré $Bu^2 + 2(C - A)u - B = 0$.

L'ellipse et l'hyperbole ont deux axes. La parabole n'a qu'un axe. Si l'on avait $B = 0$ et $A = C$, le premier membre de l'équation précédente serait identiquement nul, la courbe aurait une infinité d'axes, ce serait un cercle. En effet, avec

des axes de coordonnées rectangulaires, un cercle de rayon R et de centre a, b a pour équation

$$(x-a)^2+(y-b)^2=R^2,$$

et l'on voit que cette équation n'a pas de terme en xy et que les coefficients des termes en x^2 et y^2 sont égaux.

Les sommets d'une courbe sont les points où la courbe est rencontrée par les axes.

Réduction de l'équation du second degré à la forme la plus simple.

1° Évanouissement des termes du premier degré. Soit l'équation générale

$$Ay^2+Bxy+Cx^2+Dy+Ex+F=0; \tag{1}$$

si la courbe n'est pas une parabole, c'est-à-dire si B^2-4AC est différent de zéro, on peut transporter l'origine des coordonnées au centre de la courbe, alors les termes du premier degré disparaissent, comme nous l'avons vu à la théorie des centres, et l'équation prend la forme plus simple

$$Ay^2+Bxy+Cx^2+F'=0.$$

2° Évanouissement du terme rectangle en xy.

Admettons, pour simplifier les calculs, que la courbe représentée par l'équation (1) soit rapportée à des axes rectangulaires; rapportons-la à de nouveaux axes rectangulaires ayant même origine que les premiers, les formules de transformation sont $x=x_1\cos\alpha-y_1\sin\alpha$ et $y=x_1\sin\alpha+y_1\cos\alpha$, et l'équation de la courbe devient

$$A'y_1^2+B'x_1y_1+C'x_1^2+D'y_1+E'x_1+F=0,$$

dans laquelle les coefficients ont les valeurs ci-après :

$$\begin{aligned}
A' &= A\cos^2\alpha-B\sin\alpha\cos\alpha+C\sin^2\alpha,\\
B' &= 2(A-C)\sin\alpha\cos\alpha+B(\cos^2\alpha-\sin^2\alpha),\\
C' &= A\sin^2\alpha+B\sin\alpha\cos\alpha+C\cos^2\alpha,\\
D' &= D\cos\alpha-E\sin\alpha,\\
E' &= D\sin\alpha+E\cos\alpha.
\end{aligned}$$

Dans tout cela, nous avons une indéterminée α, dont nous pouvons disposer pour annuler le coefficient B' de xy; nous poserons donc :

$$(A-C)\sin 2\alpha+B\cos 2\alpha=0, \quad \text{d'où} \quad \operatorname{tang} 2\alpha=\frac{-B}{A-C}.$$

Réduction de l'équation du second degré dans le cas de l'ellipse et de l'hyperbole.

On rapporte d'abord la courbe à des axes rectangulaires, puis on fait disparaître les termes du 1er degré en transportant l'origine au centre de la courbe; enfin, on fait évanouir le coefficient du rectangle xy en faisant tourner les axes de coordonnées d'un angle α autour de l'origine, et l'équation de la courbe apparaît définitivement sous la forme $My^2+Nx^2=H$, qu'il est impossible de réduire davantage, puisqu'elle ne renferme qu'un terme en x et un terme en y.

Réduction de l'équation de la parabole.

On rapporte la courbe à des axes rectangulaires, et on fait disparaître le rectangle xy; en même temps un des carrés x^2 ou y^2 disparaît aussi, puisque $B^2 - 4AC = 0$, et que $B = 0$.

L'équation prendra par exemple la forme :

$$A'y^2 + D'y + E'x + F = 0.$$

On pourra ensuite faire disparaître le terme en y et le terme constant en transportant l'origine en un point $x'y'$ tel que l'on ait :

$$2A'y' + D' = 0,$$
$$A'y'^2 + D'y' + E'x' + F = 0,$$

et l'équation de la courbe aura définitivement la forme $My^2 + Px = 0$; l'axe des x est alors évidemment l'axe de la parabole.

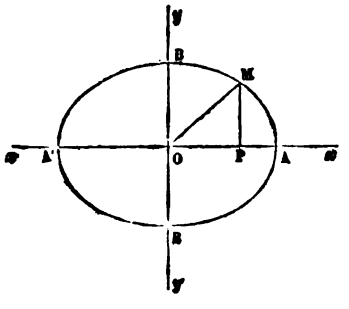
ÉTUDE DE L'ELLIPSE.

Nous avons vu que dans le cas de l'ellipse, l'équation générale du 2e degré à deux variables se ramenait à la forme simple $My^2 + Nx^2 = H$.

$B^2 - 4AC$, c'est-à-dire $-4MN$ est < 0, donc M et N sont de même signe, par exemple tous deux positifs. Si maintenant H est positif, on a : $My^2 = -Nx^2 + H$, ce qui donne pour y une valeur imaginaire : l'ellipse est imaginaire. Si H est nul, l'ellipse se réduit à un point qui est l'origine, ou bien encore à deux droites imaginaires $(My + Nx\sqrt{-1})(My - Nx\sqrt{-1})$. Enfin, si H est positif, l'ellipse est réelle, et l'équation peut s'écrire $y^2\frac{M}{H} + x^2\frac{N}{H} = 1$, ou bien (1) $\frac{y^2}{b^2} + \frac{x^2}{a^2} = 1$. Telle est la forme sous laquelle on considère d'ordinaire l'ellipse.

On tire de (1) $y = \pm\frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2}$, et l'on voit que y n'est réel que si x varie de $+a$ à $-a$, qu'elle part de zéro pour revenir à zéro en passant par un maximum qui correspond à $x = 0$, c'est-à-dire à l'origine, et ce maximum est égal à b; les axes de coordonnées sont les axes de la courbe, et leur longueur est $2a$ et $2b$. L'ellipse est formée de quatre arcs égaux, ainsi que l'indique la figure.

Fig. 26.



De l'équation $y^2 = \frac{b^2}{a^2}(a^2 - x^2)$, on tire $\frac{y^2}{(a+x)(a-x)} = \frac{b^2}{a^2}$; or $a + x = A'P$, $a - x = AP$; donc $\frac{y^2}{AP \times A'P} = \frac{b^2}{a^2}$. Ainsi le carré de l'ordonnée est au produit des segments formés sur l'axe dans un rapport constant. Cette proposition est vraie aussi pour les abscisses par rapport à l'axe des y.

Distance d'un point de la courbe au centre.

Cette distance est donnée par $R^2 = x^2 + y^2$, d'où $y^2 = R^2 - x^2$, et si dans l'équation $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, ou, ce qui revient au même, $a^2y^2 + b^2x^2 = a^2b^2$, on

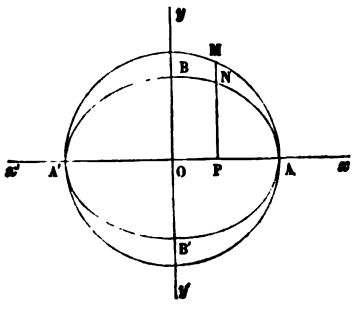
remplace y^2 par cette valeur, on aura : $a^2(R^2 - x^2) + b^2x^2 = a^2b^2$, d'où l'on tire $R = \sqrt{b^2 + \frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2}$; et l'on voit que cette distance maxima pour le point A va en décroissant jusqu'à B, où elle est minima : le grand axe est le plus grand diamètre, et le petit axe est le plus petit.

Si $b = a$, R est constant et l'ellipse devient un cercle. Pour tout point extérieur à l'ellipse $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1$ est > 0, pour tout point intérieur $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$ est < 0.

Théorème. Les ordonnées perpendiculaires au grand axe de l'ellipse sont aux ordonnées correspondantes du cercle décrit sur cet axe comme diamètre dans le rapport constant du petit axe au grand axe.

L'ordonnée NP de l'ellipse est $y = \frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2}$, l'ordonnée MP du cercle est

Fig. 27.



$Y = \sqrt{a^2 - x^2}$, car l'équation du cercle est $x^2 + Y^2 = a^2$; donc $\frac{NP}{MP} = \frac{b}{a} \cdot \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \frac{b}{a}$.

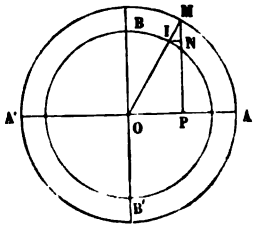
Cette propriété permet de construire facilement l'ellipse par points lorsqu'on connaît les deux axes OA, OB. Décrivons les cercles de rayon OA, OB; menons un rayon OM, et l'ordonnée MP du point I; menons IN parallèle au grand axe, on obtiendra le point N de l'ellipse, car

$$\frac{NP}{MP} = \frac{OI}{OM} = \frac{b}{a} \text{ (fig. 28).}$$

FOYERS DE L'ELLIPSE.

Le foyer d'une courbe du second degré est un point tel que la distance de ce point à chaque point de la courbe est une fonction linéaire (c'est-à-dire de la forme $Ax + By + C$) des coordonnées de ce point.

Fig. 28.



Si $\alpha \cdot \beta$ est le foyer, la distance ρ de ce point à un point xy de la courbe est $\rho = \sqrt{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2}$, et par définition $\sqrt{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2} = lx + my + n$.

L'équation (1) $(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 - (lx + my + n)^2 = 0$ s'appliquant à tous les points de la courbe, devra coïncider avec l'équation même de cette courbe. Faisons donc l'assimilation de (1) avec $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$.

D'abord, le coefficient $(-2lm)$ du terme en xy dans (1) devra être nul; faisons donc $m = 0$, la distance ρ sera donc une fonction linéaire de x seul, et si nous développons $\rho^2 = (x - \alpha)^2 + (y - \beta^2)$, et que dans le résultat nous remplacions y par $\frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2}$, nous aurons

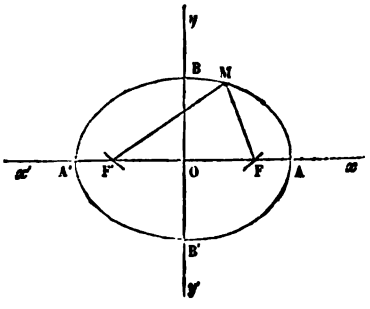
$$\rho^2 = x^2 - 2\alpha x + \alpha^2 + \frac{b^2}{a^2}(a^2 - x^2) - 2\beta\frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2} + \beta^2.$$

Or, ρ doit être rationnel, et à plus forte raison ρ^2 le sera; il est donc nécessaire que β soit nul. Les foyers sont situés sur le grand axe.

L'expression précédente devient alors :

(3) $\rho^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2}x^2 - 2\alpha x + \alpha^2 + b^2$, et pour que ρ soit linéaire, l'expression de ρ^2 doit être un carré parfait, ce qui exige qu'on ait $\alpha^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2}(\alpha^2+b^2)$, d'où l'on tire $\alpha^2 = a^2-b^2$, $\alpha = \pm\sqrt{a^2-b^2}$; α est donc réel si a est $> b$. Ainsi l'ellipse a deux foyers situés sur le grand axe à égale distance du centre et à une distance $\alpha = \sqrt{a^2-b^2}$, distance que l'on désigne d'ordinaire par la lettre c. Les foyers se construiront en décrivant du point B comme centre un arc de cercle de rayon a, et l'on obtiendra ainsi les points F et F'.

Fig. 29.



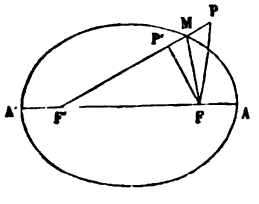
Nous avons vu que la distance FM est linéaire en x et de la forme $lx+n$; on obtiendra cette distance en remplaçant dans l'équation (3), qui donne ρ^2, α par $+c$ et $-c$, ou $+\sqrt{a^2-b^2}$ et $-\sqrt{a^2-b^2}$, ce qui donne :

$$\overline{FM}^2 = \left(a - \frac{cx}{a}\right)^2 \qquad \overline{F'M}^2 = \left(a + \frac{cx}{a}\right)$$

$$FM = a - \frac{cx}{a} \qquad F'M = a + \frac{cx}{a} \qquad \text{et} \qquad FM + F'M = 2a.$$

Ainsi l'ellipse est une courbe telle que les rayons vecteurs menés d'un point aux deux foyers ont une somme constante. Telle est la définition géométrique de l'ellipse, définition d'où l'on peut déduire presque toutes les propriétés de la courbe.

Fig. 30.



Pour un point extérieur à l'ellipse

$$FP + F'P > 2a,$$

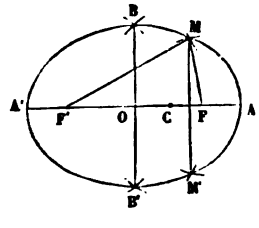
et pour un point intérieur

$$FP + F'P < 2a.$$

Construction de l'ellipse par points : Décrire du point F' avec A'C comme rayon un arc de cercle, et en décrire un autre du point F avec AC comme rayon, les points M et M' seront des points de l'ellipse, car

$$MF + MF' = AC + A'C = AA' = 2a.$$

Fig. 31.

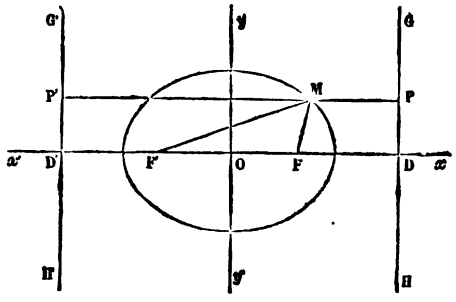


On peut décrire l'ellipse d'un mouvement continu en prenant un fil de longueur $2a$ dont on fixe les bouts en F et F', on tend le fil avec un crayon qui décrit la courbe (méthode des jardiniers).

Directrices de l'ellipse. Construisons les droites $a - \frac{cx}{a} = 0$, $a + \frac{cx}{a} = 0$; ce

sont les droites GH et G'H'. La distance MP du point M(xy) de la courbe à la droite GH est $MP = \frac{a - \frac{cx}{a}}{\left(\frac{c}{a}\right)}$,

Fig. 32.



de même $MP' = \frac{a + \frac{cx}{a}}{\left(\frac{c}{a}\right)}$, or $FM = a - \frac{cx}{a}$ et $F'M = a + \frac{cx}{a}$; nous en concluons que $\frac{FM}{MP} = \frac{c}{a}$, $\frac{F'M}{MP'} = \frac{c}{a}$. Le rapport $\frac{c}{a}$ est ce qu'on appelle l'excentricité de l'ellipse, elle indique le plus ou moins grand aplatissement de la courbe; si l'excentricité $e = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ est nulle (a restant constant), c'est que $a = b$ et la courbe est un cercle; si l'excentricité est maxima et égale à a, c'est que b est nul, et l'ellipse en s'aplatissant peu à peu s'est réduite à une ligne droite. Le théorème précédent nous a montré que : le rapport des distances d'un point de la courbe au foyer et à la directrice voisine de ce foyer est constant et égal à l'excentricité de l'ellipse.

Tangente à l'ellipse. Normale.

Soit $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ l'ellipse; la tangente au point $x'y'$ a pour équation :

$$y - y' = -\frac{f'_x(x'y')}{f'_y(x'y')}(x - x') = -\frac{\frac{x'}{a^2}}{\frac{y'}{b^2}}(x - x'),$$

ou en développant : $\frac{yy'}{b^2} + \frac{xx'}{a^2} = \frac{y'^2}{b^2} + \frac{x'^2}{a^2} = +1.$

La tangente est donc $\frac{xx'}{a^2} + \frac{yy'}{b^2} - 1 = 0.$

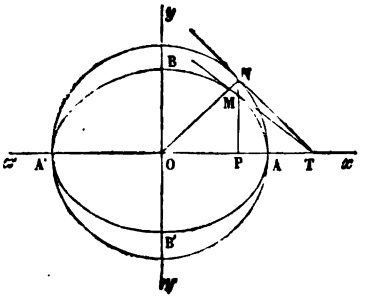
La normale étant perpendiculaire à la tangente a pour coefficient angulaire $\frac{f'_y}{f'_x}$, son équation est donc :

$$y - y' = \frac{\frac{y'}{b^2}}{\left(\frac{x'}{a^2}\right)}(x - x') = \frac{a^2 y'}{b^2 x'}(x - x').$$

La tangente $\frac{yy'}{b^2} + \frac{xx'}{a^2} - 1 = 0$ rencontre l'axe des x en un point dont les ordonnées sont $y = 0$ et $\frac{xx'}{a^2} - 1 = 0$ ou $x = \frac{a^2}{x'}$.

Ainsi, si nous considérons une série d'ellipses ayant le même axe AA', les tangentes à ces diverses ellipses ayant leur point de contact sur une même ordonnée PM iront couper le prolongement de l'axe en un même point T.

Fig. 33.

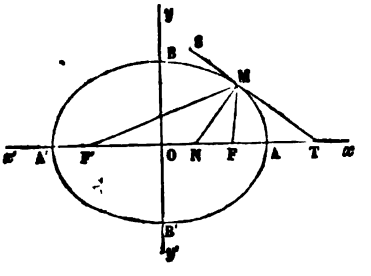


Cette circonstance permet de construire facilement la tangente au point M ; en effet, parmi toutes ces ellipses ayant AA' pour axe se trouve le cercle décrit sur AA' comme diamètre. Au point N de ce cercle, nous mènerons la tangente qui nous donnera le point T, et la tangente à l'ellipse sera la droite TM.

THÉORÈME. *Les deux rayons vecteurs en un point d'une ellipse font des angles égaux avec la tangente en ce point* M(x'y').

L'équation de MF est $y=\frac{y'}{x'-c}(x-c)$, et l'équation de MF' est $y=\frac{y'}{x'+c}(x+c)$.

Fig. 34.

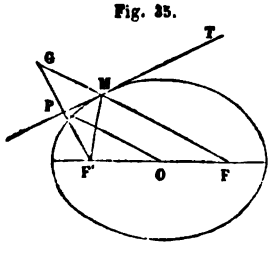


Le point T, dont les coordonnées sont O et $\frac{a^2}{x'}$, est à une distance de MF égale à $\left(\text{en appliquant la formule } d=\frac{y-ax-b}{\sqrt{1+a^2}}\right)$, $\frac{ay'}{x'}\frac{a-\frac{cx'}{a}}{\sqrt{y'^2+(x'-c)^2}}$, et à une distance de MF' égale à $\frac{ay'}{x'}\frac{a+\frac{cx'}{a}}{\sqrt{y'^2+(x'+c)^2}}$;

or $a-\frac{cx'}{a}=\sqrt{y'^2+(x'-c)^2}$ et $a+\frac{cx'}{a}=\sqrt{y'^2+(x'+c)^2}$. Il en résulte que les distances à MF et MF' sont égales entre elles et à $\frac{ay'}{x'}$. La tangente est donc bissectrice de l'angle formé par FM et par F'M prolongée. Ainsi la tangente en un point est également inclinée sur les deux rayons vecteurs; il en est de même de la normale qui est perpendiculaire à la tangente et divise l'angle FMF' en deux parties égales.

Construction de la tangente à l'ellipse.

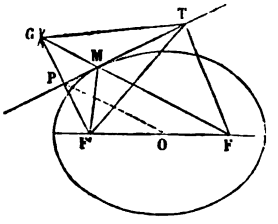
Fig. 35.



1° Tangente au point M. Prolongeons FM d'une longueur MG = MF', joignons GF'. Le triangle MGF' est isocèle et la tangente est bissectrice de l'angle en M, elle est donc perpendiculaire au milieu de la base, et on la construira en abaissant du point M une perpendiculaire à cette base F'G.

2° Tangente par un point extérieur T. Supposons le problème résolu; si TM est la tangente, cette droite est perpendiculaire au milieu P de la base F'G du triangle isocèle F'MG; il résulte de là que TF' = TG. D'autre part FG = FM + FM' = 2a. On obtiendra donc le point G au moyen de deux arcs de cercle décrits, l'un du point T comme centre avec TF' pour rayon, l'autre du point F comme centre avec 2a pour rayon.

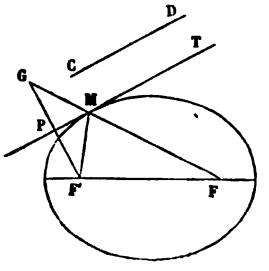
Fig. 36.



3° Tangente parallèle à une droite donnée CD.

Du point F' nous abaissons la perpendiculaire F'PG à la direction CD; du point F comme centre nous décrivons un arc avec 2a pour rayon. L'intersection de la perpendiculaire et de l'arc donne le point G; au milieu P de la longueur GF' nous élevons une perpendiculaire à cette droite, et cette perpendiculaire est la tangente cherchée.

Fig. 37.



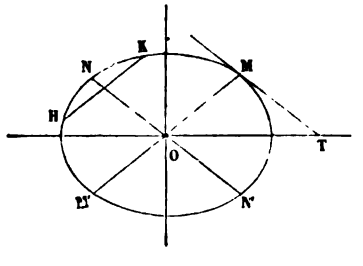
Les constructions précédentes n'exigent point que la courbe soit tracée; au contraire elles peuvent servir à la tracer plus sûrement.

L'équation de la tangente parallèle à une droite donnée $y = mx$, est $y = mx + \sqrt{a^2m^2 + b^2}$. On l'obtient en éliminant x' et y' dans l'équation de la tangente $y - y' = \frac{-b^2x'}{a^2y'}(x - x')$ au moyen des équations $-\frac{b^2x'}{a^2y'} = m$ et $\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1$. On peut encore l'obtenir en coupant l'ellipse par une droite quelconque, cherchant les points d'intersection de cette droite $y = mx + n$ avec la courbe, et exprimant que l'équation du second degré, qui donne par exemple les y des points d'intersection, a ses deux racines égales, c'est-à-dire que les deux points se confondent en un seul, ou que la sécante devient tangente. On trouve ainsi : $n = \sqrt{a^2m^2 + b^2}$.

Diamètres

Le diamètre des cordes parallèles, ayant le coefficient angulaire m, est, comme nous avons vu, $f'_x + mf'_y = 0$ en général, et, dans l'espèce, c'est $b^2x + ma^2y = 0$ ou $y = -\frac{b^2}{a^2m}x$. Tous les diamètres passent par le centre, et réciproquement. Si m' est coefficient angulaire du diamètre, on a $m' = -\frac{b^2}{a^2m}$, d'où $mm' = -\frac{b^2}{a^2}$. Telle est la relation qui lie deux diamètres conjugués.

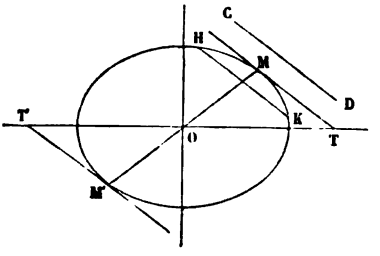
Fig. 38.



La tangente à l'extrémité M d'un diamètre MM' est parallèle aux cordes de ce diamètre, c'est-à-dire à son diamètre conjugué. En effet, cette tangente se conçoit bien comme la limite d'une corde se mou-

vant parallèlement à elle-même. D'après cela, pour construire la tangente en M, menez le diamètre MM′ et une corde HK parallèle à ce diamètre, joignez le milieu de cette corde au centre O, et menez par M une droite parallèle au diamètre ON ainsi obtenu (*fig.* 38).

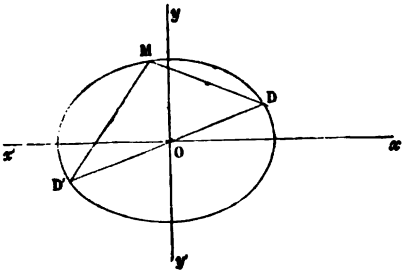
Fig. 39.



Pour mener une tangente parallèle à CD, menez la corde HK parallèle à CD, joignez le milieu de cette corde au centre, et par les extrémités M et M′ du diamètre ainsi obtenu menez des parallèles à la droite CD.

Cordes supplémentaires. Si l'on joint un point M de l'ellipse aux deux extrémités (x', y') et $(-x' - y')$ d'un même diamètre DD′, les deux cordes MD, MD′ sont dites supplémentaires, c'est-à-dire qu'elles sont parallèles à un système de diamètres conjugués, ou que le produit $\frac{y^2 - y'^2}{x^2 - x'^2}$ de leurs coefficients angulaires $\frac{y - y'}{x - x'}$ et $\frac{y + y'}{x + x'}$ est égal à $-\frac{b^2}{a^2}$.

Fig. 40.



En effet, on a les deux relations :

$$a^2y^2 + b^2x^2 = a^2b^2, \quad a^2y'^2 + b^2x'^2 = a^2b^2,$$

et en les retranchant il vient

$$\frac{y^2 - y'^2}{x^2 - x'^2} = -\frac{b^2}{a^2}.$$

La réciproque est vraie, c'est-à-dire que si deux cordes ont pour produit de leurs coefficients angulaires $-\frac{b^2}{a^2}$, la ligne DD′ passe par le centre de la courbe.

Relations entre les diamètres conjugués. L'ellipse (1) $a^2y^2 + b^2x^2 = a^2b^2$ étant rapportée à son centre et à ses axes, rapportons-la à deux diamètres quelconques, ox', oy'. Les formules de transformation sont

$$x = x'\cos\alpha + y'\cos\alpha', \quad y = x'\sin\alpha + y'\sin\alpha',$$

et en substituant dans l'équation (1), il vient

$$(a^2\sin\alpha' + b^2\cos^2\alpha')y^2 + 2(a^2\sin\alpha\sin\alpha' + b^2\cos\ \cos\alpha')xy + (a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha)x^2 = a^2b^2$$

pour annuler le coefficient de xy et ramener l'ellipse à la forme $My'^2 + Nx'^2 = H$, il suffit de poser :

$$a^2\sin\alpha\sin\alpha' + b^2\cos\alpha\cos\alpha' = 0 \quad \text{ou} \quad \text{tang}\alpha.\,\text{tang}\alpha' = -\frac{b^2}{a^2}.$$

Il en résulte que les nouveaux axes sont deux diamètres conjugués, dont nous aurons les longueurs $2a'$ et $2b'$ en faisant dans l'équation ci-dessus débarrassée

du terme en xy

$$y' = 0, \quad x' = a', \qquad \text{d'où} \qquad a'^2 = \frac{a^2b^2}{a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha},$$

$$x' = 0, \quad y' = b', \qquad \text{d'où} \qquad b'^2 = \frac{a^2b^2}{a^2\sin^2\alpha' + b^2\cos^2\alpha'},$$

et l'équation de l'ellipse rapportée à deux diamètres conjugués est

$$\frac{x^2}{a'^2} + \frac{y^2}{b'^2} = 1.$$

Il y a toujours dans une ellipse deux diamètres conjugués égaux entre eux; égalons en effet les dénominateurs des valeurs de a'^2 et de b'^2 que nous avons écrites plus haut, il viendra

$$a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha = a^2\sin^2\alpha' + b^2\cos^2\alpha',$$

ou en remplaçant $\cos^2$ par $1 - \sin^2$

$$(a^2 - b^2)\sin^2\alpha + b^2 = (a^2 - b^2)\sin^2\alpha' + b^2.$$

$\sin\alpha = \sin\alpha'$, c'est-à-dire que les deux diamètres conjugués égaux sont également inclinés sur les axes de l'ellipse, et, pour les construire, il suffira de mener les deux cordes supplémentaires qui joignent une extrémité du petit axe aux extrémités du grand axe Les parallèles à ces cordes menées par le centre seront les diamètres cherchés.

THÉORÈME. 1° La somme des carrés de deux diamètres conjugués est constante, c'est-à-dire $a'^2 + b'^2 = a^2 + b^2$. 2° Le parallélogramme construit sur deux diamètres conjugués a une surface constante, c'est-à-dire que, si θ est l'angle de ces deux diamètres, on aura $ab = a'b'\sin\theta$.

En effet : 1° $a'^2 = \dfrac{a^2b^2}{a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha}$, $b'^2 = \dfrac{a^2b^2}{a^2\sin^2\alpha' + b^2\cos^2\alpha'}$, et $\operatorname{tang}\alpha\operatorname{tang}\alpha' = \dfrac{b^2}{a^2}$.

Si l'on exprime $\sin\alpha$, $\cos\alpha$, $\sin\alpha'$, $\cos\alpha'$ en fonction de $\operatorname{tang}\alpha$, on aura

$$a'^2 + b'^2 = \frac{a^2b^2}{a^2\operatorname{tang}^2\alpha + b^2}\left(1 + \operatorname{tang}^2\alpha + \frac{a^4\operatorname{tang}^2\alpha + b^4}{a^2b^2}\right) = a^2 + b^2.$$

$$2° \quad a'^2b'^2 = \frac{a^4b^4}{a^4\sin^2\alpha\sin^2\alpha' + b^4\cos^2\alpha\cos^2\alpha' + a^2b^2(\sin^2\alpha\cos^2\alpha' + \cos^2\alpha\sin^2\alpha')}$$

Or $$a^2\sin\alpha\sin\alpha' + b^2\cos\alpha\cos\alpha' = 0,$$

et en élevant au carré cette expression

$$a^4\sin^2\alpha\sin^2\alpha' + b^4\cos^2\alpha\cos^2\alpha' = -2a^2b^2\sin\alpha\sin\alpha'\cos\alpha\cos\alpha',$$

En substituant il vient $$a'^2b'^2 = \frac{a^2b^2}{\sin^2(\alpha - \alpha')};$$

or $\alpha - \alpha' = \theta$, donc

$$a'b'\sin\theta = ab.$$

$a'b'\sin\theta$ est le double de l'aire du triangle formé par les deux diamètres et la corde qui joint leurs extrémités.

DE L'HYPERBOLE.

Beaucoup des calculs que nous avons développés pour l'ellipse vont se représenter dans l'étude de l'hyperbole. Nous nous contenterons d'en indiquer le résultat, en invitant le lecteur à s'exercer en développant ces nouveaux calculs.

L'équation étant ramenée à la forme $My^2 + Nx^2 = H$, on doit avoir $B^2 - 4AC > 0$ ou $-4MN > 0$, ce qui exige que M et N soient de signe contraire.

Si H est nul, l'équation représente deux droites.

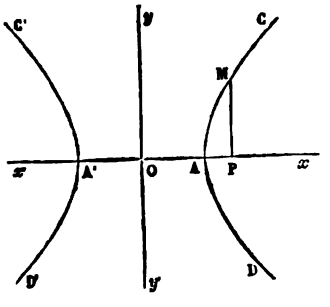
Supposons que H est de même signe que le coefficient N de x^2; nous aurons

pour $y = 0$, $\quad x = \sqrt{\frac{H}{N}} = \pm a$ quantité réelle,

$x = 0$, $\quad y = \sqrt{\frac{H}{M}} = \pm b\sqrt{1}$.

L'équation de la courbe pourra se mettre sous la forme $\frac{y^2}{b^2} - \frac{x^2}{a^2} = -1$ ou

Fig. 41.



$a^2y^2 - b^2x^2 = -a^2b^2$, ou $y = \pm \frac{b}{a}\sqrt{x^2 - a^2}$, et cette dernière équation montre bien la forme de l'hyperbole rapportée à son centre et à ses axes.

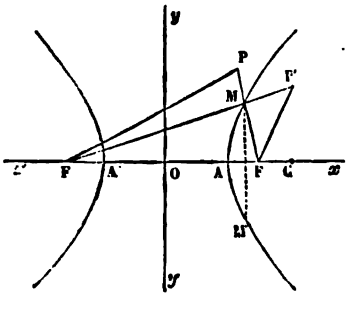
L'équation de la courbe donne

$$\frac{y^2}{(x+a)(x-a)} = \frac{b^2}{a^2} = \frac{\overline{MP}^2}{AP \times A'P}.$$

La distance du centre à un point de la courbe est minima pour les sommets A et A' de l'axe transverse et va en croissant indéfiniment à partir de ce minima. Pour tout point situé à l'intérieur des branches de l'hyperbole, on a $a^2y^2 - b^2x^2 + a^2b^2 < 0$, et pour tout point situé à l'extérieur, $a^2y^2 - b^2x^2 + a^2b > 0$.

L'hyperbole a deux foyers F et F' sur l'axe transverse à une distance du centre

Fig. 42.



$B = \pm\sqrt{a^2 + b^2}$.

La longueur FM est donnée par $\frac{cx}{a} - a$,

et la longueur F'M par $\frac{cx}{a} + a$.

La différence F'M — FM des rayons vecteurs est donc constante et égale à $2a$; telle est la définition géométrique de l'hyperbole.

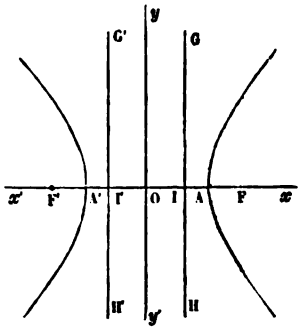
On a $F'P - FP < 2a$ et $F'P' - FP' > 2a$.

Construction par points de l'hyperbole :

Du point F' comme centre avec AC pour rayon décrire un arc de cercle, du point F comme centre décrire un autre arc avec AC pour rayon, on obtiendra le point M de l'hyperbole, car $F'M - FM = A'C - AC = 2a$.

Directrices. Si GH et G'H' sont les droites $\left(\frac{cx}{a} - a = 0\right)$ et $\left(\frac{cx}{a} + a = 0\right)$,

Fig. 43.



elles sont les directrices de l'hyperbole, c'est-à-dire que le rapport des distances d'un point de la courbe au foyer et à la directrice voisine est constant et égal à l'excentricité.

Tangente et normale.

La tangente est $y - y' = \frac{b^2x'}{a^2y'}(x - x')$ qui peut s'écrire $a^2yy' - b^2xx' = -a^2b^2$, et la normale est $y - y' = -\frac{a^2y'}{b^2x'}(x - x')$.

Le coefficient angulaire de la tangente $\frac{b^2x'}{a^2y'}$ devient, si l'on remplace y' par sa valeur $\frac{b}{a}\sqrt{x'^2 - a^2}$, égal à $\frac{b}{a\sqrt{1 - \frac{a^2}{x'^2}}}$, et ce coefficient varie depuis ∞ pour $x' = a$, jusqu'à $\frac{b}{a}$ pour $x' = \infty$. Ainsi la tangente qui est parallèle à l'axe non transverse au sommet A, va en s'inclinant par rapport à cet axe jusqu'à ce qu'elle se confonde avec l'une des deux droites $y = \pm\frac{b}{a}x$, lorsque le point de tangence s'éloigne indéfiniment. Nous verrons que ces droites sont les asymptotes de la courbe.

THÉORÈME. La tangente à l'hyperbole MT est bissectrice de l'angle des rayons vecteurs FMF' et la normale est bissectrice de l'angle supplémentaire.

Construction de la tangente à l'hyperbole :

1° En un point de la courbe. On prend sur le plus grand rayon vecteur MF' une longueur MK = MF, on abaisse du point M une perpendiculaire sur FK et c'est la tangente demandée.

Fig. 44.

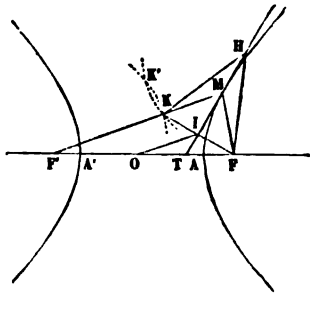
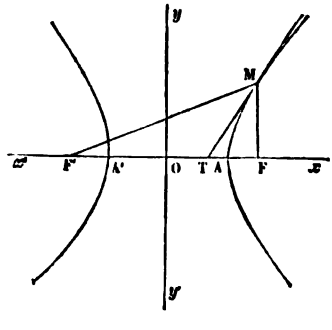


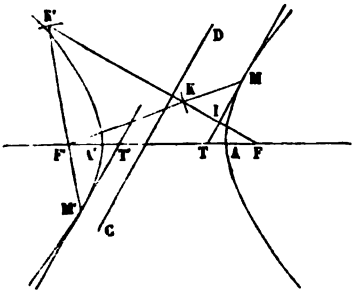
Fig. 45.



2° Tangente par un point extérieur H. Joindre HF et décrire du point H un arc de cercle avec HF pour rayon; du foyer F' avec AA' ou $2a$ pour rayon, décrire un autre arc; prendre l'un des points d'intersection K et K' de ces deux arcs, par exemple le point K; joindre FK et abaisser du point H une perpendiculaire sur cette droite FK; cette perpendiculaire est la tangente demandée, et il y a une seconde solution correspondant au point K'.

3° Tangente parallèle à une droite donnée CD.

Fig. 46.



Abaisser du point F une perpendiculaire sur CD et du point F' avec $2a$ pour rayon décrire un arc qui rencontre la perpendiculaire à CD en deux points K et K'; joindre KF' et K'F', jusqu'à la rencontre de la courbe en M et M' et par ces points mener des parallèles à CD; ce sont les tangentes cherchées. En effet, par exemple en M, on a : MF' - MF = $2a$, or F'K = $2a$, donc :

MF' — MF = F'K, MF' — F'K = MK = MF.

Le triangle FMK est donc isocèle, de plus la base FK est par construction perpendiculaire à MT; par suite la droite MT est bissectrice de l'angle FMF' et tangente à la courbe en M.

Pour que la droite FK et la circonférence de rayon $2a$ décrite du point F' se coupent, il est facile de voir que la droite CD devra être comprise entre la normale à l'axe transverse AA' et la droite qui fait avec cet axe AA' un angle dont la tangente est $\frac{b}{a}$.

La tangente parallèle à une droite donnée $y = mx$ a pour équation $y = mx \pm \sqrt{a^2m^2 - b^2}$ et sera réelle si $a^2m^2 - b^2 > 0$ ou $m > \frac{b}{a}$.

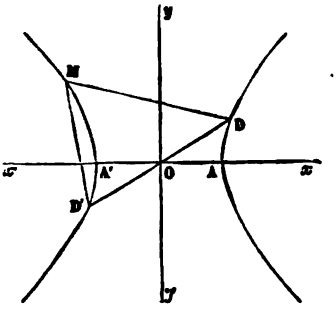
Diamètres. — La plupart des propriétés démontrées pour les diamètres de l'ellipse s'appliquent aux diamètres de l'hyperbole.

Le diamètre correspondant aux cordes m est $y = \frac{b^2}{a^2m}x$ —. Si le coefficient m des cordes est égal à $\frac{b}{a}$, celui du diamètre est aussi $\frac{b}{a}$, c'est le cas où les cordes sont parallèles aux asymptotes et alors les cordes ont un de leurs points d'intersection avec la courbe situé à l'infini.

Le coefficient m' du diamètre est égal à $\frac{b^2}{a^2m}$, donc $mm' = \frac{b^2}{a^2}$; telle est la relation qui lie les coefficients de deux diamètres conjugués.

On appelle diamètre non transverse un diamètre qui ne rencontre pas l'hyperbole; on trouve pour leurs extrémités des ordonnées imaginaires; si on enlève à ces ordonnées le symbole $\sqrt{-1}$, on trouvera des points réels que nous prendrons pour extrémités des axes non transverses.

Fig. 47.



Les cordes MD et MD', sont supplémentaires : elles sont parallèles à un système de diamètres conjugués de l'hyperbole.

L'hyperbole rapportée à deux diamètres conjugués conserve la forme de son équation

$$\frac{y^2}{b'^2} - \frac{x^2}{a'^2} = -1.$$

Et l'on a les relations :

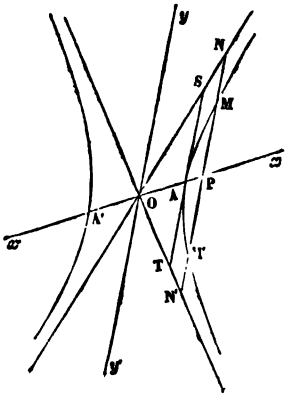
$$a'^2 - b'^2 = a^2 - b^2, \quad \text{et} \quad a'b'\sin\theta = ab.$$

Asymptotes de l'hyperbole. — On peut les chercher par la théorie générale. Mais il est

facile de voir que les droites $y = \pm \frac{b'}{a'} x$ sont les deux asymptotes; car, pour une même abscisse x, les ordonnées de la courbe sont données par : $y^2 = \frac{b'^2}{a'^2}(x^2 - a'^2)$ et celles des droites $y = \pm \frac{b'}{a'} x$, sont données par : $y'^2 = \frac{b'^2}{a'^2} x^2$. Donc $y'^2 - y^2 = b'^2$ ou $y' - y = \frac{b'^2}{y + y'}$. Si l'abscisse x augmente indéfiniment, chaque ordonnée augmente indéfiniment, donc la différence $y - y'$ tend vers zéro.

Les ordonnées MP, M'P de la courbe sont égales; les ordonnées NP, N'P des asymptotes le sont aussi; car les y de la courbe sont données par $y = \pm \frac{b'}{a'} \sqrt{x^2 - a'^2}$, et les y des asymptotes par $y = \pm \frac{b'}{a'} x$. Donc les longueurs MN et M'N' sont égales, et, comme limite, AS, AT. Ainsi, les longueurs d'une tangente comprises entre le point de contact et chaque asymptote sont égales entre elles.

Fig. 48.



Nous avons trouvé plus haut

$$y'^2 - y^2 = b'^2 = (y' - y)(y + y'),$$

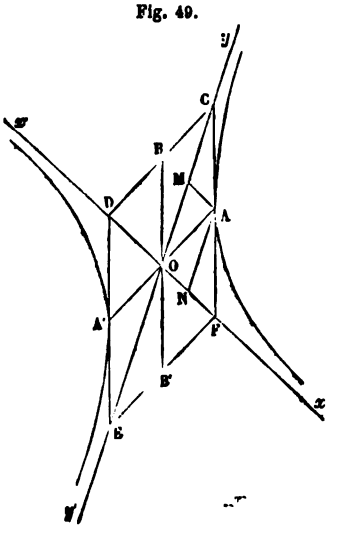
donc

$$MN' \times MN = (y + y')(y' - y) = b'^2.$$

Ainsi, le rectangle des parties d'une sécante comprises entre un point de la courbe et les deux asymptotes est constant et égal au carré du demi-diamètre parallèle à la sécante. Il en résulte qu'à la limite, les parties AT, AS de tangente sont égales au demi-diamètre b' parallèle à la tangente.

Hyperbole rapportée à ses asymptotes. — Au paragraphe précédent, nous venons de voir que $AC = AF = b'$, or $OA = a'$ diamètre conjugué de b'. Le parallélogramme CDEF est donc le parallélogramme construit sur deux diamètres conjugués et son aire $4a'b' \sin\theta$ est constante et égale à l'aire $4ab$ du rectangle des axes de la courbe. Le triangle COF, quart du parallélogramme total, a pour mesure $a'b' \sin\theta$, et le parallélogramme AMON est la moitié de ce triangle. Le parallélogramme AMON est donc constant et égal à $\frac{ab}{2}$; mais, si l'hyperbole est rapportée à ses asymptotes, $AN = y$ et $AM = x$, et, en appelant α l'angle des deux asymptotes, l'équation de l'hyperbole sera :

Fig. 49.



$$xy \sin\alpha = \frac{ab}{2}; \quad \text{or} \quad \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} = \frac{b}{a}, \quad \sin\frac{\alpha}{2} = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}},$$

$$\cos\frac{\alpha}{2} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad \sin\alpha = 2\sin\frac{\alpha}{2}\cos\frac{\alpha}{2}.$$

Donc l'équation devient $xy = \frac{a^2+b^2}{4}$.

PARABOLE.

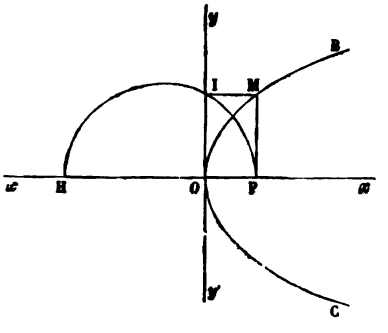
Nous avons vu que dans le cas où l'équation du second degré représente une parabole ($B^2 - 4AC = 0$), elle peut se ramener à la forme simple

$$My^2 + Px = 0, \quad \text{ou mieux} \quad y^2 = 2px.$$

Si p est < 0, nous changeons le sens de l'axe des abscisses, ce qui revient à remplacer x par $-x$, et nous trouvons la même courbe que si p était > 0, mais on l'a fait tourner de 180° dans son plan.

Supposons donc $p > 0$, nous aurons $y = \pm\sqrt{2px}$, et l'on voit que y est réel pour x positif, que y part de zéro pour $x = 0$, et va en croissant indéfiniment avec x.

Fig. 50.



On voit que $\frac{MP^2}{OP} = \text{constante } 2p$; ce qui permet de construire la parabole par points en prenant $OH = 2p$, décrivant une circonférence sur HP comme diamètre, et élevant OI que l'on ramèn en PM par une parallèle IM à l'axe des x; en effet,

$$\overline{MP}^2 = \overline{OI}^2 = OP \cdot OH = OP \cdot 2p.$$

Pour un point extérieur à la parabole, $y^2 - 2px$ est > 0, et pour tout point intérieur $y^2 - 2px$ est < 0.

Foyer de la parabole.

Soit $\alpha.\beta$ le foyer de la parabole; la distance d'un point de la courbe à ce foyer est une fonction linéaire des coordonnées $x.y$ du point de la courbe, et

l'on a : $$\rho = \sqrt{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2} = lx + my + n,$$

d'où (1) $$(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 - (lx + my + n)^2 = 0,$$

équation qui doit être identique à celle de la parabole (2) $y^2 = 2px$.

L'équation (2) ne renferme pas xy, donc $-2lm = 0$. Supposons $m = 0$,

alors $$\rho^2 = (x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 = x^2 - 2\alpha x + \alpha^2 + y^2 - 2\beta y + \beta^2$$
$$\rho^2 = x^2 - 2\alpha x + \alpha^2 + 2px - 2\beta\sqrt{2px} + \beta^2$$

ρ et ρ^2 doivent être rationnels, donc β est nul, et alors

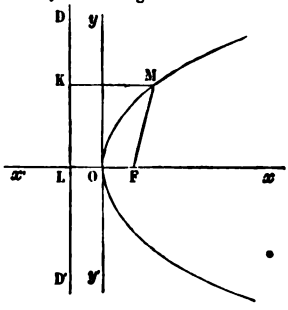
(3) $$\rho^2 = x^2 - 2(\alpha - p)x + \alpha^2;$$

le second membre sera un carré parfait, si

$$(\alpha - p)^2 = \alpha^2, \quad \text{d'où} \quad \alpha = \frac{p}{2}.$$

Si nous avions fait $l=0$, ρ serait fonction linéaire de y seul, et en substituant à x la valeur $\frac{y^2}{2p}$, on arrive pour ρ^2 à une expression du 4e degré en y. Donc la parabole n'a qu'un foyer F, situé à une distance $OF=\frac{p}{2}$ du sommet O de la courbe. La quantité p s'appelle le paramètre de la parabole.

Fig. 51.



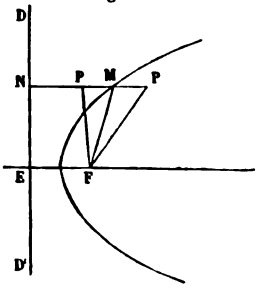
L'équation (3) nous donne

$$\rho^2 = x^2 + px + \frac{p^2}{4}\left(x+\frac{p}{2}\right)^2,$$

donc $$\rho = MF = x + \frac{p}{2}.$$

Directrice.

Fig. 52.



Construisons la droite $x+\frac{p}{2}=0$ ou $x=-\frac{p}{2}$. La istance du point M de la courbe à cette droite sera précisément $x+\frac{p}{2}$. Donc MF = MK, et géométriquement la parabole est définie une courbe telle que les distances d'un de ses points à un point fixe et à une droite fixe sont égales.

Pour un point intérieur à la courbe PF est < PN, pour un point extérieur PF > PN.

Construire la parabole par points :

Étant donnés le foyer F et la directrice DD', on abaisse FE perpendiculair sur DD', FE est l'axe de la parabole et le milieu S de FE est le sommet;

Fig. 53.

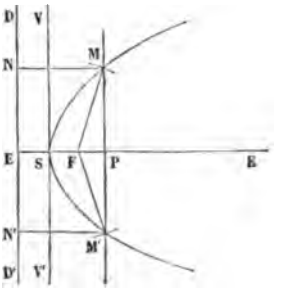
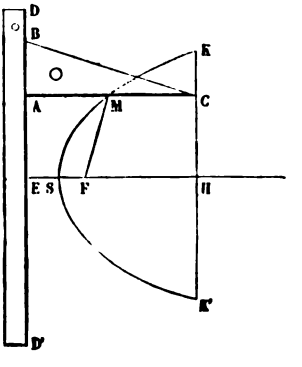


Fig. 54



pour construire un point quelconque dont l'abscisse est SP, on élève l'ordonnée en P et de F comme centre avec EP pour rayon on décrit un arc qui donne les points M et M', car MN = EP = MF. Pour tracer la courbe par mouvement continu, on fixe un fil de longueur CA au sommet C d'une équerre

et au foyer F, on fait mouvoir l'équerre le long de la directrice DD', en maintenant par un crayon le fil le long du côté de l'équerre. Le crayon décrit la courbe, car

$$CM + MF = CM + MA, \quad \text{donc} \quad MF = MA.$$

Théorème : La parabole est la limite d'une ellipse dont un foyer F reste constant ainsi que la distance AF de ce foyer au sommet, et dont l'autre foyer s'éloigne à l'infini.

Soit $a^2y^2 + b^2x^2 = a^2b^2$ une ellipse dont $2a$ est le grand axe. Si l'on remplace x par $x - a$, ce qui revient à transporter l'axe des y du centre au sommet de la courbe, l'équation de la courbe devient :

$$(1) \qquad y^2 = 2\frac{b^2}{a}x - \frac{b^2}{a^2}x^2.$$

La distance du sommet au foyer est $a - \sqrt{a^2 - b^2}$; elle reste constante tandis que a augmente indéfiniment,

$$a - \sqrt{a^2 - b^2} = \frac{p}{2} \qquad b^2 = pa - \frac{p^2}{4}.$$

Substituant dans (1), il vient $y^2 = 2px - \frac{px(2x+p)}{2a} + \frac{p^2x^2}{4a^2}$, et à la limite pour $a = \infty$, $y^2 = 2px$, c'est-à-dire que l'ellipse est devenue parabole

Tangente et normale.

La tangente a pour équation

$$y - y' = -\frac{f'_x}{f'_y}(x - x') = \frac{2p}{2y'}(x - x') = \frac{p}{y'}(x - x'),$$

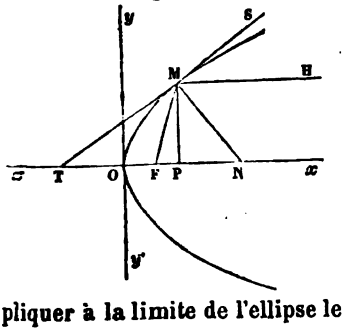
$$yy' - y'^2 = px - px' \quad \text{ou bien (1)} \quad yy' = px + y'^2 - px' = px + px' = p(x + x').$$

La normale est $$y - y' = -\frac{y'}{p}(x - x').$$

La tangente, dont l'équation est (1), coupe l'axe des x au point $y = 0$ et $x = -x'$, c'est-à-dire que la sous-tangente PT est partagée par le sommet A en deux parties égales.

La normale $y - y' = -\frac{y'}{p}(x - x')$ coupe l'axe des x au point donné par $y = o$ et $-y' = -\frac{y'}{p}(x - x')$ ou $x - x' = p$. Il en résulte que la sous-normale $PN = x - x'$ est constante et égale au paramètre p de la parabole.

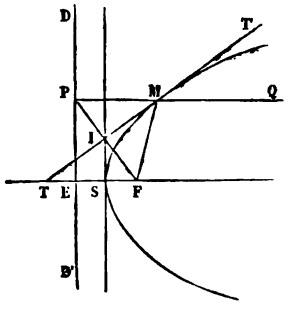
Fig. 55.



La tangente fait des angles égaux avec le rayon vecteur et avec la perpendiculaire à la directrice. En effet, la parabole étant la limite de l'ellipse dont un foyer s'en va à l'infini, le second rayon vecteur correspondant à ce foyer devient parallèle à l'axe des x, c'est-à-dire perpendiculaire à la directrice. Il suffit d'appliquer à la limite de l'ellipse le théorème démontré pour elle.

Construire la tangente à la parabole :

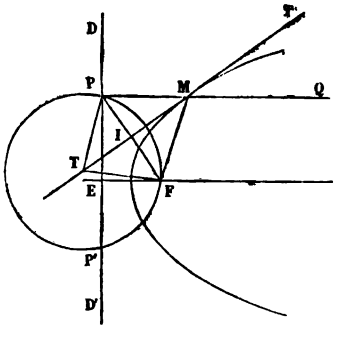
Fig. 56.



1° En un point M ; abaisser la perpendiculaire FE à la directrice, prendre sur l'axe ainsi construit une longueur FT = FM, la droite TM est la tangente cherchée. La droite FP est perpendiculaire à la tangente, car le triangle FMP est isocèle et la tangente partage l'angle au sommet M en deux parties égales. Le point I étant le milieu de FP, la parallèle à la directrice passant en I passe au milieu de FE, c'est-à-dire qu'elle est tangente au sommet A. On voit que le lieu des pieds I des perpendiculaires abaissées du foyer sur les tangentes à la parabole est la tangente au sommet pour l'ellipse ; ce lieu est pour l'ellipse le cercle décrit sur le grand axe comme diamètre, et l'on voit que lorsqu'un des sommets A' de l'ellipse s'en va à l'infini, ce cercle devient d'un rayon infini et se transforme en une droite qui est la tangente au point A. Un cercle de rayon infini est une ligne droite.

2°. Tangente par un point T. Du point T comme centre avec TF pour rayon décrire un arc qui coupe la directrice en P et P'. Joindre PF et abaisser de T une perpendiculaire sur PF ; mener par P une parallèle à l'axe, PM, elle donnera par sa rencontre avec TI le point de tangence M. Si la courbe était tracée, il suffirait par P de mener une parallèle à l'axe des x, qui donnerait le point M, TM serait la tangente. Le point P' donne une seconde solution.

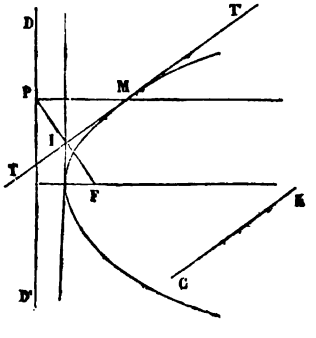
Fig. 57.



3°. Tangente parallèle à une droite donnée CK.

Abaisser FP perpendiculaire à CK, et par le milieu I de FP mener une parallèle à CK. Si l'on veut avoir le point de contact, il faudra par P mener une parallèle PM à l'axe jusqu'à la rencontre de la droite IT.

Fig. 58.



La tangente en $x'y'$ est $yy' = p(x + x')$; si l'on veut avoir l'équation de la tangente parallèle à la droite $y = mx$, il faudra faire

$$m = \frac{p}{y'} \quad \text{et} \quad y'^2 = 2px',$$

ce qui donne $y' = \frac{p}{m}$ et $x' = \frac{p^2}{2pm^2}$.

L'équation de la tangente est alors

$$y = mx + \frac{p}{2m}.$$

Diamètres.

Soit m une direction de cordes dans la parabole $y^2 = 2px$, le diamètre correspondant est $mf'y + fx = 0$, c'est-à-dire $2my - 2p = 0$, $y = \frac{p}{m}$. Tous les diamètres sont parallèles à l'axe, ce qui se conçoit en considé-

rant la parabole comme limite d'une ellipse dont le centre s'en va à l'infini. Toute parallèle à l'axe est un diamètre.

Le diamètre $y=\frac{p}{m}$ rencontre la courbe au point x', et $y'=\frac{p}{m}$; cette relation donne $m=\frac{p}{y}$, or $\frac{p}{y}$ est le coefficient angulaire de la tangente en $x'y'$, donc les cordes d'un diamètre sont parallèles à la tangente à l'extrémité de ce diamètre.

Rapporter la parabole à un diamètre et à la tangente à l'extrémité de ce diamètre.

$y^2=2px$. Remplaçons y par $(b+x\sin\alpha+y\sin\alpha')$ et x par $(a+x\cos\alpha+y\cos\alpha')$, il viendra : $(b+x\sin\alpha+y\sin\alpha')^2=2p(a+x\cos\alpha+y\cos\alpha')$, qui reprendra la forme $y^2=2p'x$, si l'on pose.

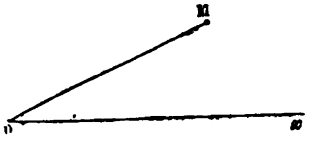
$$\sin\alpha\sin\alpha'=0 \quad \sin^2\alpha=0 \quad b\sin\alpha'-p\cos\alpha'=0 \quad b^2-2pa=0.$$

Or ces quatre relations sont vérifiées par le système de coordonnées choisi, puisque $\sin\alpha=0$, car le diamètre est parallèle à l'axe; $\tan\alpha'=\frac{p}{b}$; car $\tan\alpha'$ est le coefficient angulaire de la tangente au point ab. De même $b^2-2pa=0$, car le point ab appartient à la parabole. Donc, la nouvelle forme de l'équation est $y^2=2p'x$ et $p'=2a+p$.

DES COORDONNÉES POLAIRES.

Nous avons vu qu'il y avait un nombre indéfini de systèmes de coordonnées; le plus répandu, après le système des coordonnées rectilignes, est celui des coordonnées polaires. Un axe ox étant donné, le point M est déterminé par son rayon vecteur $\rho=OM$ et par l'angle ω de OM avec l'axe fixe. Le point O est le pôle et Ox l'axe polaire.

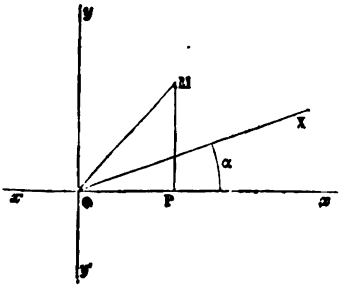
Fig. 59.



ρ variant de O à ∞ et ω de 0° à 360°, on pourrait obtenir tous les points du plan; pour plus de généralité, on ne fixe pas de limites à ω et ρ peut être négatif. De sorte que ρ et ω peuvent se remplacer par ρ et $2K\pi+\omega$, ou par $-\rho$ et $(2K+1)\pi+\omega$.

Pour passer des coordonnées rectilignes aux coordonnées polaires, et inversement, on aura les formules :

Fig. 60.



$$x=\rho\cos(\omega+\alpha), \quad y=\rho\sin(\omega+\alpha),$$

et $$\rho=\sqrt{x^2+y^2}; \quad \tan(\omega+\alpha)=\frac{y}{x},$$

et si l'axe polaire coïncide avec l'axe des x, ce qui est le cas ordinaire,

$$x=\rho\cos\omega, \quad y=\rho\sin\omega,$$

et $$\rho=\sqrt{x^2+y^2}; \quad \tan\omega=\frac{y}{x}.$$

Équation de la ligne droite.

L'équation $Ay+Bx+C=0$ devient, en

coordonnées polaires, $\rho = \frac{-C}{A\sin\omega + B\cos\omega}$; ou, en posant $\operatorname{tang}\alpha = -\frac{B}{A}$,

$= \frac{-\frac{C}{A}}{\sin\omega - \operatorname{tang}\alpha\cos\omega}$, ce qui se réduit à $\rho = \frac{K}{\cos(\omega-\alpha)}$.

Courbes du second degré.

Ellipse. $a^2y^2 + b^2x^2 = a^2b^2$. Prenons pour pôle le foyer F′ et pour axe polaire le grand axe F′A, on aura :

$$x = -c + \rho\cos\omega, \quad y = \rho\sin\omega.$$

En substituant et observant que $a^2 - b^2 = c^2$, il vient :

$$\left(1 - \frac{c^2}{a^2}\cos^2\omega\right)\rho^2 - \frac{2b^2c}{a^2}\rho\cos\omega - \frac{b^4}{a^2} = 0; \text{ si l'on pose } \frac{b^2}{a} = p \text{ et } \frac{c}{a} = e$$

$$(1 - e\cos^2\omega)\rho^2 - 2pe\rho\cos\omega - p^2 = 0,$$

d'où $\rho = \frac{p}{1 - e\cos\omega}$ et $\rho = \frac{-p}{1 + e\cos\omega}$.

L'une quelconque de ces équations, par exemple $\rho = \frac{p}{1 - e\cos\omega}$ donne tous les points de la courbe. Si ω croît de 0° à 180°, ρ diminue de $\frac{p}{1-e}$ à $\frac{p}{1+e}$; si ω croît de 180° à 360°, ρ augmente de $\frac{p}{1+e}$ à $\frac{p}{1-e}$.

La seconde équation donne les mêmes points que la première, car les points ρ,ω et $-\rho,\pi+\omega$ sont les mêmes, et si, dans la seconde équation, on remplace ρ par $-\rho$ et ω par $\pi+\omega$, elle devient identique à la première.

Hyperbole. Si l'on prend le foyer F pour pôle, on trouve $\rho = \frac{p}{1 - e\cos\omega}$; mais ici e est > 1, tandis que dans l'ellipse e est < 1. Nous pouvons donc poser $\cos\alpha = \frac{1}{e}$ et ρ devient $\frac{p\cos\alpha}{\cos\alpha - \cos\omega}$.

ω variant de zéro à α, ρ est négatif et va croissant en valeur absolue jusqu'à $-\infty$; on obtient la moitié inférieure de la branche à abscisses négatives, ω variant de α à π, ρ est infini et décroît constamment; pour $\omega = \pi$, ρ donne le sommet A; on a obtenu de la sorte la branche des abscisses positives. ω variant de π à 2π, on trouve les deux branches de l'hyperbole symétriques des premières par rapport à l'axe des x.

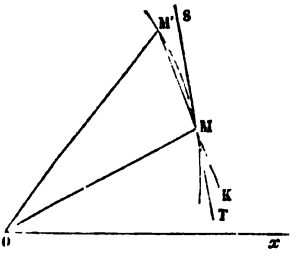
Parabole. $y^2 = 2px$. Si nous voulons la rapporter à son foyer comme pôle et à son axe, il faudra faire $y = \rho\sin\omega$ et $x = \frac{p}{2} + \rho\cos\omega$. En substituant, on trouve $\frac{p}{1 - \cos\omega} = \rho$, et cette formule donne toute la courbe quand ω varie de π à 2π.

Les courbes du deuxième degré sont donc contenues dans la formule $\rho = \frac{p}{1 - e\cos\omega}$ qui donne : 1° une ellipse, si $e < 1$; 2° une hyperbole, si $e > 1$; 3° une parabole, si $e = 1$.

Tangentes aux courbes en coordonnées polaires.

Soient deux points voisins M et M' de la courbe, ρ,ω et $\rho+\Delta\rho,\omega+\Delta\omega$. L'angle OMK de la sécante MM' avec le rayon vecteur est à la limite l'angle de la tangente en M avec son rayon vecteur. On a :

Fig. 61.



$$\frac{OM'}{OM}=\frac{\rho+\Delta\rho}{\rho}=\frac{\sin OMM'}{\sin OM'M}=\frac{\sin OMK}{\sin(OMK-\Delta\omega)}$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho}=\frac{\sin OMK-\sin(OMK-\Delta\omega)}{\sin(OMK-\Delta\omega)}$$

ou
$$\frac{\Delta\rho}{\rho.\Delta\omega}=\frac{2\sin\frac{\Delta\omega}{2}\cos\left(OMK-\frac{\Delta\omega}{2}\right)}{\Delta\omega\sin\left(OMK-\frac{\Delta\omega}{2}\right)},$$

ce qui devient
$$\frac{\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\omega}\right)}{\rho}=\frac{\sin\frac{\Delta\omega}{2}}{\frac{\Delta\omega}{2}}\times\text{cotang}\left(OMK-\frac{\Delta\omega}{2}\right),$$

et à la limite, $\frac{\rho'}{\rho}=\frac{1}{\text{tang V}}$. En résumé, $\text{tang V}=\frac{\rho}{\rho'}$.

Exemple. *La spirale d'Archimède.* $\rho=b\omega$ est une courbe formant une spirale indéfinie autour du pôle, puisque ρ augmente indéfiniment avec ω; les spires consécutives interceptent des longueurs égales sur un même rayon vecteur, car pour ce rayon les valeurs de ω sont: ω, $\omega+2\pi$, $\omega+4\pi$ ..... et les valeurs de ρ correspondantes sont: $b\omega$, $b\omega+2\pi b$, $b\omega+4b\pi$ .....

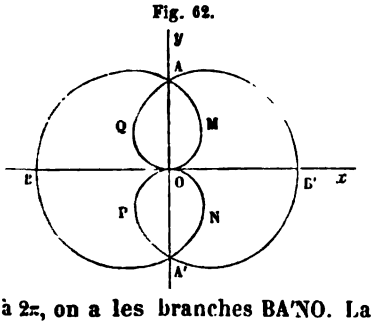
L'angle de la tangente au point ρ,ω est donné par

$$\text{tang V}=\frac{\rho}{\rho'}=\frac{b\omega}{b}=\omega.$$

On voit que, à mesure que l'on s'avance sur la courbe, l'angle V part de zéro pour se rapprocher indéfiniment d'un angle droit, à mesure que sa tangente se rapproche de l'infini. A l'origine, V est nul ainsi que ρ, et la courbe part du pôle tangentiellement à l'axe polaire.

Autre exemple. Étudier la courbe $\rho=a\sin\frac{1}{2}\omega$.

Fig. 62.



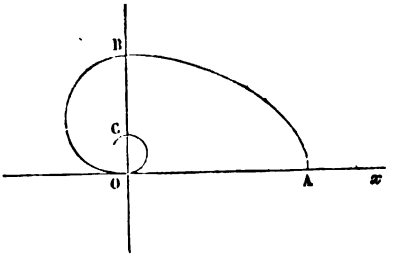
Pour $\omega=0$ $\rho=0$, la courbe passe au pôle et est tangente à l'axe polaire en ce point. ω allant de 0 à $\frac{\pi}{2}$, ρ croît jusqu'à $\frac{a\sqrt{2}}{2}$, et l'on a la branche OMA. ω allant de $\frac{\pi}{2}$ à π, ρ croît de $\frac{a\sqrt{2}}{2}$ à a, et l'on a la branche AB. ω allant de π à $\frac{3\pi}{2}$, puis de $\frac{3\pi}{2}$ à 2π, on a les branches BA'NO. La courbe sera complète quand ω aura crû de 2π à 4π.

La tangente en chaque point est donnée par

$$\operatorname{tang} V = \frac{\rho}{\rho'} = \frac{a \sin \frac{1}{2}\omega}{a \frac{1}{2} \cos \frac{1}{2}\omega}, \quad \text{donc} \quad \operatorname{tang} V = 2 \operatorname{tang} \frac{1}{2}\omega.$$

Étudier la courbe $\rho = \frac{a \sin \omega}{\omega}$. Pour $\omega = 0$, $\rho = a$, et l'on a le point A.

Fig. 63.



ω allant de 0 à $\frac{\pi}{2}$, ρ décroît de a à $\frac{2a}{\pi}$, car sa dérivée est constamment négative, et l'on a la branche AB. ω allant de $\frac{\pi}{2}$ à π, ρ décroît de $\frac{2a}{\pi}$ à 0, et l'on a la branche BO. ω allant de π à $\frac{3\pi}{2}$, ρ est négatif, et l'on a la branche *oc*. On aura une série de spires indéfinies ayant pour point asymptote le point *o*, puisque ρ s'approche de zéro à mesure que ω augmente.

Autres exercices : 1° La courbe $\rho = ae^{m\omega}$ est la spirale logarithmique. La tangente est donnée par $\operatorname{tang} V = \frac{\rho}{\rho'} = \frac{ae^{m\omega}}{mae^{m\omega}} = \frac{1}{m}$. Ainsi l'angle du rayon vecteur avec la tangente est constant.

2° La courbe $\rho = 4 + \cos 5\omega$ est une sorte d'étoile à cinq branches comprise entre les cercles décrits du pôle avec les rayons 3 et 5.

ÉTUDE DE QUELQUES COURBES A COORDONNÉES RECTILIGNES.

I. Une courbe parabolique est une courbe de la forme $y = f(x)$.

Discutons $y = 2x^3 - 3x^2 - 3x + 2$. La dérivée de y est

$$y' = 6x^2 - 6x - 3.$$

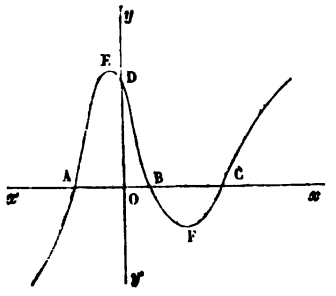
y admet les racines $-1, \frac{1}{2}$ et 2; y' admet les racines $\frac{1-\sqrt{3}}{2}$ et $\frac{1+\sqrt{3}}{2}$. Donc

$$y = (x+1)(2x-1)(x-2), \quad y' = \frac{1}{2}(2x-1+\sqrt{3})(2x-1-\sqrt{3}).$$

Pour $x = 0$, $y = 2$. La courbe coupe l'axe des x aux points A(−1), B($\frac{1}{2}$) et C(2).

x croissant de $-\infty$ à $1 - \frac{\sqrt{3}}{2} = -0{,}36$, on voit que y va toujours croissant, part de l'∞ négatif pour s'annuler en A pour $x = -1$, et croîtra encore jusqu'à l'abscisse $\frac{1-\sqrt{3}}{2}$ auquel correspond un maximum de l'ordonnée et une tangente horizontale en E. De $\frac{1-\sqrt{3}}{2}$ à $\frac{1+\sqrt{3}}{2}$, les deux binômes de la dérivée sont de

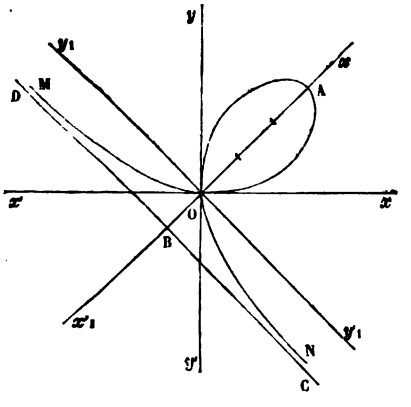
Fig. 64.



signes contraires, la dérivée y' est négative, l'ordonnée y va en diminuant de A à F en passant par les valeurs $y = 2$ pour $x = 0$ (point D) et $y = 0$ pour $x = \frac{1}{2}$ (point B). Au point F, correspond un minimum de l'ordonnée (en valeur absolue c'est un maximum, parce que l'ordonnée est négative). x variant de $\frac{1+\sqrt{3}}{2}$ à $+\infty$, y croît; de négative elle devient positive en passant par zéro. A partir du point C commence une branche infinie. On voit que les deux branches infinies sont justement appelées paraboliques puisqu'elles n'ont pas d'asymptotes.

II. Folium de Descartes. $y^3 - 3axy + x^3 = 0$.

Fig. 65.



Transformons d'abord l'équation, en prenant au lieu des axes ox, oy les axes ox_1, oy_1 inclinés à 45° sur le premiers. On a, en appelant α l'angle de l'axe ox_1 avec l'axe ox,

$$x = x_1\cos\alpha - y_1\sin\alpha,\quad y = x_1\sin\alpha + y_1\cos\alpha,$$

et dans le cas actuel

$$\sin\alpha = \cos\alpha = \sin 45° = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

L'équation deviendra :

$$(3a + 3x\sqrt{2})y^2 + x^3\sqrt{2} - 3ax^2 = 0,$$

d'où $$y = \frac{x\sqrt{3a - x\sqrt{2}}}{\sqrt{2}\sqrt{a + x\sqrt{2}}}.$$

La courbe ne renfermant que le terme y^3 est symétrique par rapport à ox_1, nous ne nous occuperons que des valeurs positives de y. Pour que y soit réel, il faut que x soit $> -\frac{a}{\sqrt{2}}$ et $< \frac{3a}{\sqrt{2}}$, c'est-à-dire que la courbe est comprise entièrement entre les ordonnées menées par A et B, tels que $oB = \frac{oA}{3} = \frac{a}{\sqrt{2}}$. Pour $x = \frac{3a}{\sqrt{2}}$, y est nul, pour $x = 0$, y est encore nul; d'où la portion Ao de courbe. Pour $x = -\frac{a}{\sqrt{2}}$ y est ∞ et va croissant depuis l'origine; d'où une branche qui a pour asymptote la droite *CBD*.

III. Une courbe de forme analogue à celle du folium est la strophoïde; c'est le lieu des points définis comme il suit : du point fixe A, de la figure précédente, on mène une droite quelconque qui coupe l'axe oy_1 en un point R; de chaque côté de R on prend des longueurs RR', RR'' égales à RO; les points R' et R'' sont des points de la strophoïde. Ils donnent une courbe tout à fait semblable au

folium, excepté que $oB = oA$. L'équation de la strophoïde est $y = \pm x\sqrt{\frac{a-x}{a+x}}$, et en coordonnées polaires $\rho = \frac{a\cos 2\omega}{\cos\omega}$.

IV. Limaçon de Pascal. Étant donnés une circonférence et un point de cette circonférence A, on mène par A une sécante AM qui rencontre la circonférence en un second point M, à gauche et à droite duquel on prend une longueur constante MN, MN'. Le lieu des points N et N' est un limaçon de Pascal, facile à construire. Si l'on prend pour pôle le point A et pour axe polaire le diamètre du cercle passant en A, que l'on appelle b le diamètre du cercle et a la longueur constante MN, l'équation du limaçon sera $\rho = a + b\cos\omega$.

V. Rosace à quatre branches. Une droite de longueur constante se meut en s'appuyant constamment par ses extrémités A et B sur les côtés ox, oy d'un angle droit. Du point o, on abaisse une perpendiculaire sur AB; le pied M de cette perpendiculaire décrit une rosace à quatre branches quand la droite AB se promène dans les quatre angles des ox et oy. Si o est le pôle et ox l'axe polaire $\rho = a\sin 2\omega$.

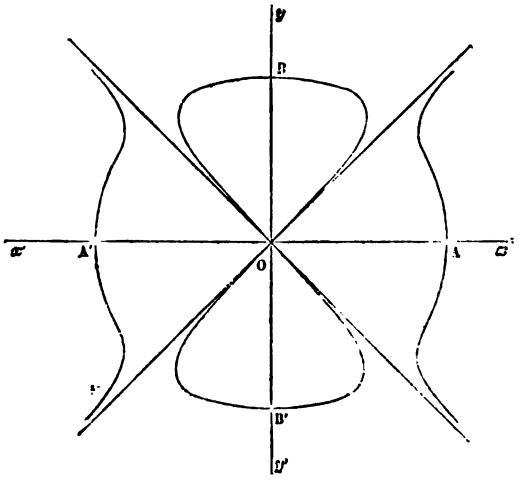
VI. Étudier la courbe $y^4 - 96a^2y^2 + 100a^2x^2 - x^4 = 0$.

Elle a deux axes ox et oy, et l'origine est centre de la courbe.

Elle coupe l'axe des y aux points $x = 0$ et $y = \pm 4a\sqrt{6}$ (B et B'),
id x *id.* $y = 0$ et $x = \pm 10a$ (A et A').

On a : $$y = \pm\sqrt{48a^2 \pm \sqrt{(x-6a)(x+6a)(x-8a)(x+8a)}}.$$

Fig. 66.



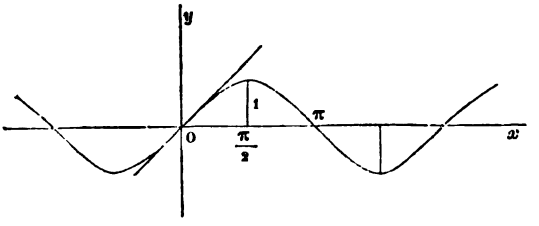
De $x = 0$ à $x = 6a$, on a quatre valeurs de y égales deux à deux, et l'on obtient la moitié de droite des boucles B et B'. De $x = 6a$ à $x = 8a$, y est imaginaire. Pour $x = 8a$, $y = \pm a\sqrt{48}$; de $x = 8a$ à $x = 10.a$ (point A), on obtient quatre valeurs de y égales à deux. Enfin de $10.a$ à $+\infty$, on n'a plus que deux valeurs réelles de y.

Les tangentes à l'origine sont $y = -\frac{f'_x(o)}{f'_y(o)}$, soit $y = \pm\frac{5}{\sqrt{24}}x$. Il y a deux

asymptotes qui sont données par l'équation $y^4 - x^4 = 0$, obtenue en égalant à zéro les termes du degré le plus élevé dans l'équation, et ces asymptotes sont $y = \pm x$, c'est-à-dire les deux bissectrices des angles.

VII. Sinussoïde $y = \sin x$. La dérivée est $y' = \cos x$. La courbe se

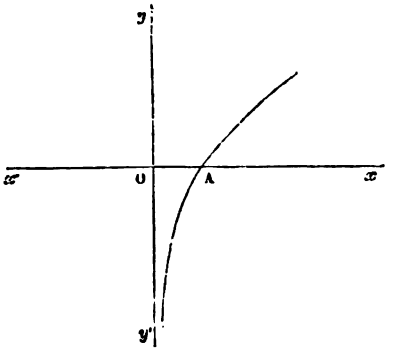
Fig. 67.



compose d'une ligne ondulée qui s'écarte également, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous de ox. Les tangentes aux points de rencontre avec l'axe des x sont inclinées à 45° sur cet axe.

VIII. Courbe logarithmique $y = \mathrm{L}x$, $y' = \frac{1}{x}$. L'ordonnée est croissante de $-\infty$ à $+\infty$ pour x allant de 0 à $+\infty$. L'axe des y est asymptote.

Fig. 68.



IX. La chaînette, courbe naturelle prise par un câble fixé en deux points a pour équation :

$$y = \frac{a}{2}\left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}}\right).$$

C'est une courbe régulière de forme parabolique, symétrique par rapport à l'axe des y et ayant son sommet sur cet axe au point $y = a$. La dérivée est

$$y' = \frac{a}{2}\left(e^{\frac{x}{a}} - e^{-\frac{x}{a}}\right).$$

X. La lemniscate de Bernouilli est le lieu des points M, tels que le produit des distances de ces points à deux points fixes F et F', est constante et égale au carré (c^2) de la distance FF'. L'équation de cette courbe est facile à trouver, quand on la rapporte à son centre O, milieu de FF' et à ses deux axes FF' et la perpendiculaire oy à FF'.

XI. La cycloïde est la courbe engendrée par un point d'une circonférence qui roule sans glisser sur une droite fixe. Si a est le rayon du cercle mobile, et qu'on prenne pour origine la position où le point de la circonférence est sur la droite fixe, on a : $x = a(\omega - \sin\omega)$ et $y = a(1 - \cos\omega)$.

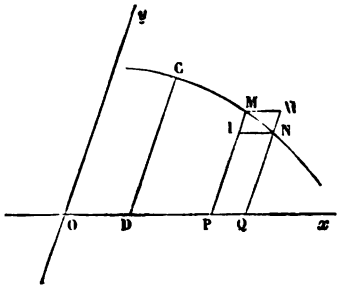
L'épicycloïde est le lieu décrit par un point d'une circonférence qui roule sans glisser sur une circonférence fixe. L'épicycloïde peut être intérieure ou extérieure. C'est la courbe usuelle des dents d'engrenage.

CALCUL DE L'AIRE D'UNE COURBE PLANE.

Considérons l'aire comprise entre une ordonnée fixe CD d'une courbe plane et l'ordonnée MP correspondant à l'abscisse variable x.

Cette aire CDMP est une fonction implicite de x dont nous allons chercher la différentielle. Si l'on attribue à x un accroissement infiniment petit dx représenté par PQ, l'aire considérée augmente du trapèze curviligne MNPQ, auquel on peut substituer le parallélogramme PQNI en négligeant le triangle MNI qui est un infiniment petit du second ordre. On a donc, en appelant S la surface comptée à partir de l'ordonnée CD, et en supposant les axes de coordonnées rectangulaires,

Fig. 69.



$$ds = \text{rectangle NIPQ} = y\,.\,dx,$$

et la surface depuis l'abscisse (a) jusqu'à l'abscisse (b) sera

$$S_a^b = \int_a^b y dx.$$

En coordonnées polaires, si OM est le rayon vecteur ρ correspondant à l'angle ω, le point voisin $(\rho + d\rho,\ \omega + d\omega)$ donne un second rayon vecteur OM' et le triangle curviligne MOM' est l'accroissement dS de la surface; ce triangle se confond à la limite avec le secteur d'un cercle ayant pour rayon $OM = \rho$ et pour angle au centre $d\omega$. L'arc qui sert de base à ce segment a pour longueur $\rho\,.\,d\omega$ et la surface du segment est

$$dS = \rho d\omega \times \frac{\rho}{2} = \frac{\rho^2}{2} d\omega,$$

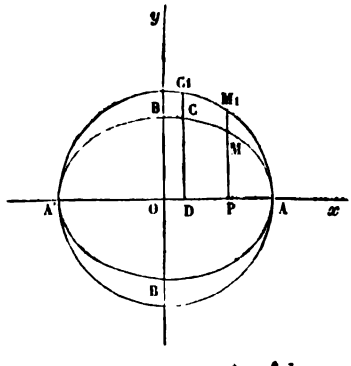
et la surface comprise entre les angles α et α_1 est

$$S_\alpha^{\alpha_1} = \int_\alpha^{\alpha_1} \frac{\rho^2}{2}\,.\,d\omega.$$

Le calcul des aires est donc ramené au calcul des intégrales définies dont nous avons parlé en analyse.

Aire de l'ellipse. Considérons l'aire OBMP, elle a pour différentielle :

Fig. 70.



$$dS = ydx = \frac{b}{a} dx \sqrt{a^2 - x^2},$$

$$S = \frac{b}{a}\int dx \sqrt{a^2 - x^2} = \frac{b}{a}\,.\int dx \frac{a^2 - x^2}{\sqrt{a^2 - x^2}} =$$

$$= \frac{b}{a}\left(\int \frac{dx\,.\,a^2}{\sqrt{a^2 - x^2}} - \int \frac{x^2 dx}{\sqrt{a^2 - x^2}}\right).$$

Or

$$\int \frac{dx a^2}{\sqrt{a^2 - x^2}} = a^2 \int \frac{d\left(\frac{x}{a}\right)}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = a^2\,.\,\text{arc sin}\,\frac{x}{a};$$

et si l'on intègre par parties :

$$\int \frac{x^2 dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \frac{x}{2}\sqrt{a^2 - x^2} - \frac{a^2}{2}\,\text{arc sin}\,\frac{x}{a}.$$

Donc $$S = \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{2}\left(x\sqrt{a^2 - x^2} + a^2 \operatorname{arc\,sin} \frac{x}{a}\right).$$

et pour avoir le quart de l'ellipse, il faut prendre

$$S_0^a = \frac{1}{2}\frac{b}{a}\left(a^2 \cdot \frac{\pi}{2} - o\right) = \frac{1}{4}\pi ab.$$

L'aire totale de l'ellipse est donc πab.

On pouvait y arriver plus simplement, en remarquant que la projection, d'une aire plane sur un plan quelconque est égale à l'aire projetée multipliée par le cosinus de l'angle des deux plans. Nous avons vu que l'ordonnée de l'ellipse pouvait se déduire de l'ordonnée du cercle décrit sur le grand axe comme diamètre en multipliant cette dernière par $\frac{b}{a}$; d'après cela l'ellipse peut se considérer comme la projection d'un cercle ayant AA' pour diamètre et situé dans un plan dont l'angle avec le plan de l'ellipse a pour cosinus $\frac{b}{a}$. Dans cette hypothèse chaque ordonnée MP de l'ellipse est la projection de l'ordonnée M_1P_1 du cercle; le rectangle élémentaire MPM'P' formé par deux ordonnées voisines de l'ellipse est la projection du rectangle $M_1P_1M'_1P'_1$, et l'aire du premier est égale à l'aire du second multipliée par le cosinus de l'angle des deux plans.

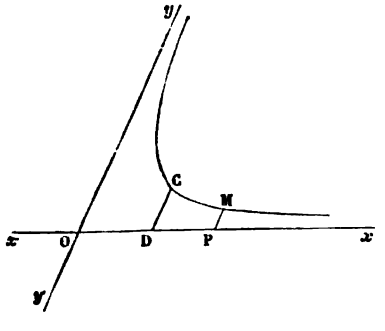
Il en résulte que l'aire de l'ellipse est la projection de l'aire du cercle, et qu'elle est mesurée par

$$S = \pi a^2 \times \frac{b}{a} = \pi ab$$

Aire d'un segment d'hyperbole.

L'équation de l'hyperbole rapportée à des asymptotes est $xy = m^2$. Le parallélogramme élémentaire MPM'P', dérivée de l'aire CDMP a pour mesure $ydx \sin\theta$, en appelant θ l'angle des asymptotes. Donc

Fig. 71.



$$ds = ydx \sin\theta = m^2 \sin\theta \frac{dx}{x}.$$

En intégrant

$$\int = m^2 \sin\theta \int \frac{dx}{x} = m^2 \sin\theta \cdot Lx,$$

et l'intégrale définie

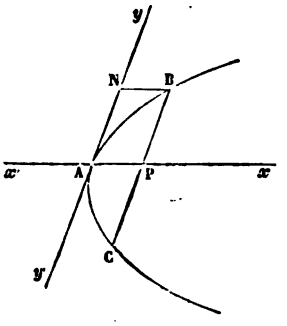
$$\int_a^b = m^2 \sin\theta\,(Lb - La).$$

De là vient le nom de logarithmes hyperboliques donné aux logarithmes néperiens.

Aire d'un segment de parabole.

Évaluez le segment ACB. L'équation de la parabole rapportée au diamètre Ax et à la tangente Ay à l'extrémité est $y^2 = 2p'x$. Si θ est l'angle yAx, on aura

Fig. 72.



$$dS = y\,dx \sin\theta = \sqrt{2p'x}\,dx \sin\theta = \sqrt{2p'} \sin\theta\, x^{\frac{1}{2}}\,dx,$$

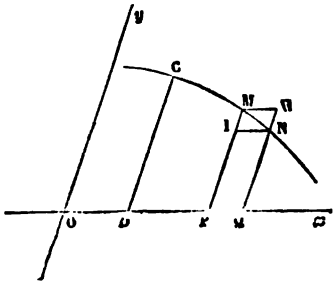
$$S = \sqrt{2p'} \sin\theta \frac{2}{3} x^{\frac{3}{2}} = \frac{2}{3} x \sin\theta \sqrt{2p'x} = \frac{2}{3} xy \sin\theta.$$

L'aire du segment BAC est donc les $\frac{2}{3}$ du parallélogramme ayant pour côtés la corde BC et la partie du diamètre conjugué de BC comprise entre l'arc et la corde.

LONGUEUR D'UN ARC DE COURBE PLANE.

Soit une courbe rapportée à des axes rectangulaires, et un point M de cette courbe; on donne à x l'accroissement dx, il en résulte pour y l'accroissement dy et pour l'arc l'accroissement $MN = d\sigma$. L'arc MN peut se remplacer par sa corde qui est évidemment l'hypoténuse d'un triangle rectangle MIN, donc

Fig. 73.



$$\overline{d\sigma}^2 = \overline{dx}^2 + \overline{dy}^2, \quad d\sigma = dx\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}.$$

L'intégrale définie donnera pour l'arc compris entre les abscisses (a) et (b), une longueur

$$\sum_a^b = \int_a^b dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}.$$

DES SECTIONS CONIQUES.

Étude des sections faites dans un cône droit par un plan.

Toute section faite par un plan dans un cône droit est une courbe du 2e degré.

Le cône droit est formé de deux nappes; un plan passant par le sommet S d'un cône et faisant avec l'axe zz' un angle moindre que $\beta = ZSB$, demi-angle au sommet du cône, coupe le cône suivant deux de ses génératrices. Un plan perpendiculaire à l'axe coupe le cône suivant un cercle puisque l'angle d'une génératrice avec l'axe du cône est constant.

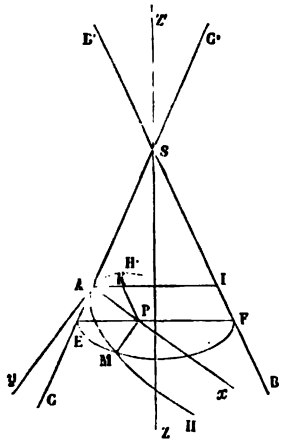
Ceci posé, prenons pour plan de la figure le plan mené par l'axe perpendiculairement au plan sécant HAH'; ce plan sécant est coupé par le plan de la figure

suivant la ligne Ax et nous poserons

$$SAx = \alpha \quad \text{et} \quad SA = d.$$

Rapportons la courbe HAH' à l'axe Ax et à la perpendiculaire Ay à Ax. Cette droite Ay étant située dans le plan sécant qui est perpendiculaire au plan de la figure et étant perpendiculaire à l'intersection Ax des deux plans, est perpendiculaire au plan de la figure.

Fig. 74.



Soit M un point quelconque de la courbe HAH', MP = y et AP = x; par le point M menons un plan perpendiculaire à l'axe du cône, ce plan coupe le plan de la figure suivant EF et le cône suivant un cercle EMF dont EF est le diamètre. On a :

$$(1) \qquad \overline{MP}^2 = EP \times PF = y^2.$$

Le triangle AEP donne $\frac{EP}{AP} = \frac{\sin\alpha}{\cos\beta}$, donc $EP = x\frac{\sin\alpha}{\cos\beta}$. Menons maintenant AI parallèle à EF et PK parallèle à BS, il vient : $PF = KI = 2d\sin\beta - AK$. Mais le triangle PAK donne $\frac{AK}{x} = \frac{\sin APK}{\sin AKP} = \frac{\sin(\alpha+2\beta)}{\cos\beta}$. En effet, AKP = EFB, et EFB est le supplément de $EFS = \frac{\pi}{2} - \beta$, donc $\sin AKP = \cos\beta$. D'autre part,

$$APK = \pi - AKP - PAK = \pi - \left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) - \left(\alpha - \frac{\pi}{2} + \beta\right) = \pi - 2\beta - \alpha,$$

donc

$$\sin APK = \sin(\alpha + 2\beta).$$

D'après cela, l'équation (1) peut s'écrire

$$(2) \qquad y^2 = \frac{2d\sin\alpha\sin\beta}{\cos\beta}x - \frac{\sin\alpha\sin(\alpha+2\beta)}{\cos^2\beta}x^2,$$

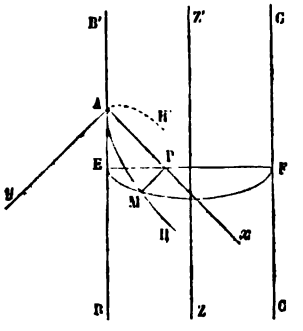
et l'on voit qu'elle est du second degré ; elle représente la section HAH'.

L'équation (2) représente une ellipse, une hyperbole ou une parabole, suivant que $\alpha + 2\beta$ est inférieur, supérieur ou égal à 180° ; c'est-à-dire que, 1° si la droite Ax coupe deux génératrices d'une même nappe du cône, la courbe est une ellipse ; 2° si Ax coupe deux génératrices appartenant l'une à une nappe, l'autre à l'autre, la courbe est une hyperbole ; 3° si Ax est parallèle à une génératrice SB du cône, la courbe est une parabole.

On verrait réciproquement que l'on peut toujours placer sur un cône donné une ellipse ou une parabole donnée. On ne peut y placer une hyperbole qu'autant que l'angle des asymptotes est $\leq$ à l'angle 2β au sommet du cône.

Pour un cylindre droit, la section est une ellipse HAH' ou deux droites parallèles si le plan sécant est parallèle aux génératrices du cylindre.

Fig. 75.



En effet, $\overline{MP}^2 = EP \times PF = y^2$.

Le triangle AEP donne $EP = x \sin\alpha$; et, si $2r$ est le diamètre de la section droite EMF du cylindre, on aura

$$PF = 2r - x\sin\alpha.$$

L'équation de la courbe HAH' est donc

$$y^2 = 2rx\sin\alpha - x^2\sin^2\alpha,$$

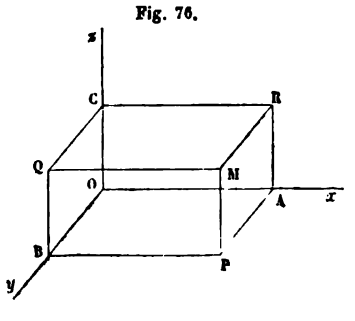
c'est-à-dire une ellipse.

GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE A TROIS DIMENSIONS.

COORDONNÉES RECTILIGNES.

Si xoy, xoz, yoz sont trois plans fixes rectangulaires entre eux, un point de l'espace M est déterminé par l'intersection de trois plans parallèles aux plans fixes. Les trois longueurs OA, OB, OC qui déterminent la position des plans mobiles, distances affectées du signe + ou du signe —, suivant qu'elles sont portées dans les directions Ox, Oy, Oz ou Ox', Oy', Oz', sont les coordonnées rectilignes du point M et on les désigne ordinairement par $x \cdot y \cdot z$.

Fig. 76.

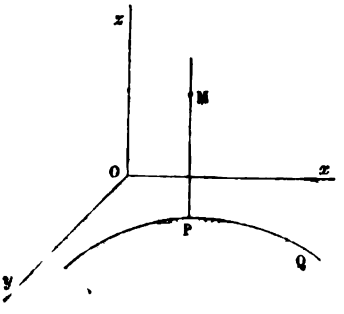


On obtient tous les points de l'espace en faisant varier x, y, z de $-\infty$ à $+\infty$. Les points A·B·C sont les projections du point M sur chacun des trois axes; les points R, P, Q sont les projections de M sur chacun des plans fixes et ces points ont pour coordonnées dans leur plan fixe deux des coordonnées x, y, z du point M. Ordinairement, les trois plans fixes sont rectangulaires, et le parallélipipède MQCRPBOA est rectangle. Les projections sont orthogonales.

Une équation $\varphi(x, y) = 0$ qui ne renferme que deux coordonnées, représente

une courbe PQ située dans le plan perpendiculaire à l'axe dont la lettre manque dans l'équation. Si par un point P de la courbe, on mène une parallèle à Oz, tout point de cette parallèle OM a pour coordonnées x et y. Donc, l'équation $\varphi(x \cdot y) = 0$ représente un cylindre parallèle à l'axe des z, c'est-à-dire à l'axe dont l'ordonnée manque dans l'équation.

Fig. 77.



Si la courbe $\varphi(x \cdot y) = 0$ est linéaire, elle représente une droite du plan xy et en même temps un plan parallèle à l'axe de z. Une équation qui ne renferme qu'une inconnue $\varphi(z) = 0$ représente autant de plans parallèles au plan xy que l'équation admet de racines réelles; en effet $z =$ constante représente un plan parallèle au plan xy.

Représentation des surfaces par une équation, et réciproquement.

Si nous nous reportons à l'avant-dernière figure et que nous considérions le point M comme appartenant à une surface, on voit que le point M dépend de la position du point P par exemple dans le plan xy. Si l'on change la valeur des coordonnées x et y, le point P variera et la parallèle menée par le nouveau point P à l'axe Oz rencontrera la surface en un ou plusieurs points M, dont la position dans l'espace dépendra de la position du point P dans le plan. On aura donc $z = \varphi(x \cdot y)$ pour déterminer OM, c'est-à-dire que z est une fonction de deux variables indépendantes x et y. Quelquefois z ne pourra être mis sous la forme explicite, et sera liée à x, y par une équation implicite $\varphi(x \cdot y \cdot z) = 0$.

Réciproquement toute équation à trois variables représente une surface.

Soit $\varphi(x \cdot y \cdot z) = 0$, donnons à z une valeur quelconque c, l'équation se dédouble en deux $z = c$ (c'est-à-dire un plan parallèle à xy), et $\varphi(x \cdot y \cdot c) = 0$ (c'est-à-dire une courbe plane située dans le plan $z = c$). Si l'on fait varier c, la courbe $\varphi(x \cdot y \cdot c) = 0$ variera généralement de forme et de position, et il est évident que la succession de ces courbes variables infiniment rapprochées, engendrera une surface.

Représentation des lignes par deux équations, et réciproquement.

Deux équations $F(x, y, z) = 0$, $\varphi(x, y, z) = 0$ représentent une ligne, car une ligne peut toujours se concevoir comme l'intersection de deux surfaces, et les équations $F = 0$, $\varphi = 0$ représentant chacune une surface, l'ensemble des deux équations représentera les points communs aux deux surfaces, c'est-à-dire leur intersection.

De même, par une ligne, on peut toujours faire passer deux surfaces connues donnant lieu à deux équations dont l'ensemble représentera la ligne. En général, il sera plus simple de prendre pour surfaces deux des trois cylindres projetant la ligne sur les plans fixes, et alors la ligne sera représentée par

$$\varphi(x, y) = 0, \quad \text{et} \quad \psi(x, z) = 0.$$

Un point est représenté par un système d'équations à trois variables.

Car entre les trois équations $f(x, y, z) = 0$, $f_1(x, y, z) = 0$, $f_2(x, y, z) = 0$, on peut toujours supposer théoriquement que l'on élimine les variables x et y; restera une équation en z donnant plusieurs valeurs de z auxquelles correspondront des valeurs de x et y, d'où résulte une série de points de l'espace. Pour représenter

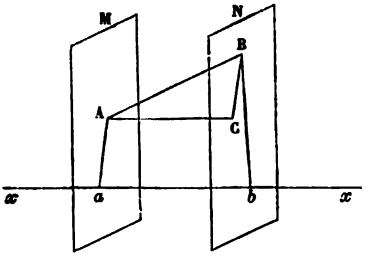
un point, il sera plus simple de choisir comme surfaces les trois plans menés par le point parallèlement aux plans fixes, et les trois équations nécessaires seront alors

$$x=a,\quad y=b,\quad z=c.$$

TRANSFORMATION DES COORDONNÉES. — THÉORIE DES PROJECTIONS.

Avant d'aborder la transformation des coordonnées, il est bon de dire quelques mots de la théorie des projections, qui nous sera fort utile en mécanique. Nous ne définirons point la projection d'une figure (notion familière au lecteur).

Fig. 78.

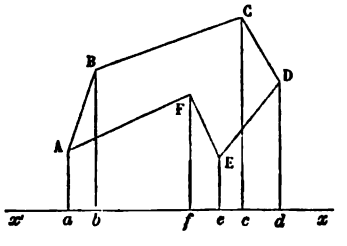


Nous admettrons encore que la projection d'une droite AB sur un axe xx' est égale à cette droite AB multipliée par le cosinus de l'angle qu'elle fait avec l'axe. Pour déterminer le signe de la projection, nous dirons :

La projection, sur une droite xx', d'une droite finie AB dont la direction est celle d'un mobile qui se mouverait de A vers B, est égale au produit de AB par le cosinus de l'angle aigu, droit ou obtus que la direction AB forme avec la direction $x'x$.

Théorème fondamental. La somme des projections des côtés d'un polygone fermé sur une direction quelconque est nulle, la direction de chaque côté étant celle d'un mobile qui parcourt le polygone en marchant toujours dans le même sens.

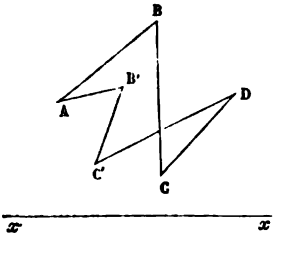
ig. 79.



En effet, si D est le sommet le plus éloigné du point de départ A, il est clair que la projection du mobile qui est parti du point A est allé en D et est revenu en A, a fait autant de chemin à l'aller qu'au retour ; or les projections dans un sens sont positives, dans l'autre elles sont négatives, donc leur somme algébrique est nulle, et le théorème est démontré.

D'après cela, deux contours fermés ABCD, AB'C'D terminés aux mêmes points

Fig. 80.



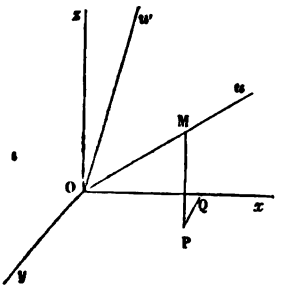
ont même projection sur un axe donné. En effet, le contour fermé ABCDD'C'A a une projection algébriquement nulle sur l'axe xx'. Or cette projection se compose de deux parties, l'une positive entre (a) et (d), l'autre négative entre (d) et (a); elles sont égales et de signe contraire.

En particulier : la somme des projections consécutives de plusieurs droites sur un axe est égale à la projection de la ligne résultante, c'est-à-dire de la ligne qui joint les points extrêmes.

PROBLÈME. *Trouver l'angle de deux droites dont on donne les angles* $\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'$ *avec les trois axes de coordonnées.*

Soit θ cet angle. Prenons sur la première droite Ou une longueur $OM = 1$. La droite OM a pour projections sur les trois axes OQ, QP et PM qui sont égaux à $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$, puisque $OM = 1$; si maintenant nous projetons le contour OMPQO sur la seconde droite Ou', nous savons que la projection de OM sera égale à la somme des projections des droites MP, PQ et OP dont les angles avec Ou' sont $\alpha'\beta'\gamma'$. Donc

Fig. 81.



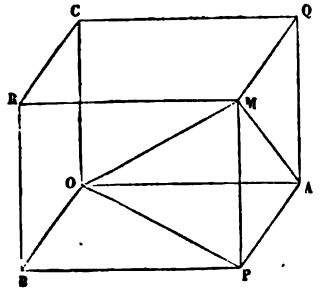
$$\cos\theta = \cos\alpha\cos\alpha' + \cos\beta\cos\beta' + \cos\gamma\cos\gamma'.$$

Deux droites seront perpendiculaires entre elles si

$$\cos\alpha\cos\alpha' + \cos\beta\cos\beta' + \cos\gamma\cos\gamma' = 0.$$

THÉORÈME. Étant donnés une droite $OM = 1$ et trois axes rectangulaires, les coordonnées du point M forment un parallélipipède rectangle dans lequel

Fig. 82.



$$\overline{OM}^2 = \overline{MP}^2 + \overline{AP}^2 + \overline{OA}^2.$$

D'après cela $1 = \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma$.

Un point M étant donné, la distance $OM = l$ de ce point à l'origine est donnée par

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

La distance MM' de deux points est la diagonale du parallélipipède rectangle qui a pour côtés les différences $x-x'$, $y-y'$, $z-z'$, des coordonnées des points M et M'; donc

$$\overline{MM'}^2 \text{ ou } l^2 = (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2.$$

THÉORÈME. La projection d'un triangle CAB sur un plan qui contient sa base a pour mesure l'aire de ce triangle multipliée par le cosinus de l'angle α des deux plans. En effet (*fig.* 84).

$$\text{aire ABc} = \frac{AB}{2} \times cO = \frac{AB}{2} \times CO \times \cos\alpha = \text{aire ABC} \times \cos\alpha.$$

Si le plan de projection est quelconque, on peut toujours le supposer passant

Fig. 83.

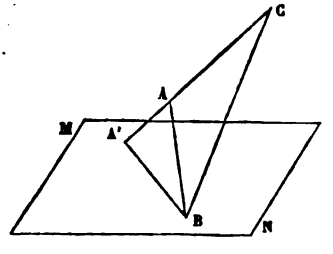
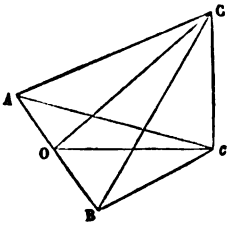


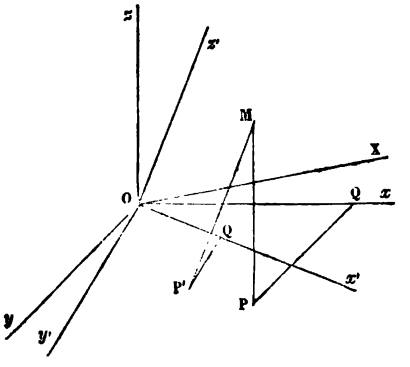
Fig. 84.



par un sommet B du triangle, et alors le triangle CAB est la différence de deux triangles CA'B, AA'B rentrant dans le cas précédent.

Le théorème étant démontré pour un triangle s'étend immédiatement à un contour fermé quelconque qui n'est qu'un polygone d'un nombre infini de côtés.

Fig. 85.



Changement des axes.

Si l'on passe simplement d'une origine à une autre $x'y'z'$, il suffit pour avoir les nouvelles équations de remplacer x par $x+x'$, y par $y+y'$ et z par $z+z'$.

Supposons maintenant que l'on passe du système rectangulaire $Oxyz$ au système rectangulaire $Ox'y'z'$, les coordonnées de M seront données par le contour MPQO dans le 1er cas, MP'Q'O dans le second.

Si $a.b.c$ désignent les cosinus de ox avec ox' oy' oz',
a' b' c' oy avec ox' oy' oz',
$a''b''c''$ oz avec ox' oy' oz',

on aura, en projetant les deux contours MPQO, MP'Q'O successivement sur chacun des trois axes $ox.oy.oz$ et égalant leurs projections,

$$x = ax' + by' + cz',$$
$$y = a'x' + b'y' + c'z',$$
$$z = a''x' + b''y' + c''z'.$$

Mais il y a entre les neuf quantités $a.b.c$, $a'b'c'$, $a''b''c''$ six relations distinctes résultant des théorèmes de projection démontrées plus haut :

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1, \qquad aa' + bb' + cc' = 0,$$
$$a'^2 + b'^2 + c'^2 = 1, \qquad aa'' + bb'' + cc'' = 0.$$
$$a''^2 + b''^2 + c''^2 = 1, \qquad a'a'' + b'b'' + c'c'' = 0.$$

DU PLAN.

L'équation générale du 1er degré à 3 variables $Ax + By + Cz + D = 0$ représente un plan. En effet, pour avoir la trace de la surface sur les trois plans de projection, il faut faire $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$, d'où $Ax + By + D = 0$, $Ax + Cz + D = 0$, $By + Cz + D = 0$, équation de trois droites qui se rencontrent sur les axes et forment un triangle dans l'espace. Si l'on coupe maintenant la surface par un plan $z = c$, on obtient une droite $Ax + By + Cc + D = 0$, qui est parallèle à $Ax + By + D = 0$, puisque leurs équations diffèrent par une constante Cc. Cette droite $Ax + By + Cc + D = 0$ s'appuie en outre sur la droite $Ax + Cz + D = 0$. Ainsi la surface est engendrée par une droite qui s'appuie sur une droite fixe en restant parallèle à une autre droite fixe : cette surface est un plan.

Réciproquement, un plan est représenté par une équation du 1er degré, car soient $z = ax + \gamma$, $z = by + \gamma$ les traces de ce plan sur les plans fixes xz, yz, on peut disposer des coefficients de l'équation $Ax + By + Cz + D = 0$, de manière à ce qu'elle soit satisfaite pour les deux droites $z = ax + \gamma$ et $z = by + \gamma$, et alors elle représentera le plan donné. Il suffit de poser

$$\frac{A}{C} = -a, \quad \frac{B}{C} = -b, \quad \frac{D}{C} = -\gamma,$$

et l'équation du plan est $z - ax - by - \gamma = 0$.

Deux plans $Ax + By + Cz + D = 0$, $A'x + B'y + C'z + D' = 0$ sont parallèles lorsque leurs traces sur deux des plans de projection sont parallèles. Il faut alors que l'on ait

$$\frac{A}{A'} = \frac{B}{B'} = \frac{C}{C'}.$$

L'équation du plan passant par un point $x'y'z'$ est $A(x-x') + B(y-y') + C(z-z') = 0$.

Le plan passant par trois points situés sur les axes à des distances de l'origine a, b, c, a pour équation

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1.$$

Les plans passant par l'intersection de deux plans donnés sont renfermés dans l'équation générale

$$(Ax + By + Cz + D) + \lambda(A'x + B'y + C'z + D') = 0.$$

Angles de la normale au plan avec les axes.

Le plan $Ax + By + Cz + D = 0$ coupe les axes aux points $a = -\frac{D}{A}$, $b = -\frac{D}{B}$, $c = -\frac{D}{C}$.

Si de l'origine O on abaisse une perpendiculaire au plan et qu'on en joigne le pied aux points $a.b.c$, que l'on appelle l la longueur de la perpendiculaire et $\alpha.\beta.\gamma$ ses angles avec les axes, on aura

$$l = a\cos\alpha = b\cos\beta = c\cos\gamma \quad \text{ou} \quad -\frac{l}{D} = \frac{\cos\alpha}{A} = \frac{\cos\beta}{B} = \frac{\cos\gamma}{C},$$

$$\text{ou bien } \frac{l}{D} = \frac{\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma}}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}.$$

Ces équations donnent α, β, γ et l.

Angle de deux plans.

C'est l'angle de leurs normales menées par l'origine.

$$\cos V = \cos\alpha\cos\alpha' + \cos\beta\cos\beta' + \cos\gamma\cos\gamma' = \frac{AA' + BB' + CC'}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}\sqrt{A'^2 + B'^2 + C'^2}},$$

et les deux plans seront perpendiculaires si $AA' + BB' + CC' = 0$.

Distance d'un point à un plan.

La distance l de l'origine au plan est $l = \frac{\pm D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$.

Transportons l'origine au point donné $x'y'z'$, l'équation du plan deviendra

$$Ax + By + Cz + (Ax' + By' + Cz' + D) = 0,$$

et la distance l du point au plan sera

$$l = \frac{Ax' + By' + Cz' + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}.$$

Équations d'une droite.

Une droite est représentée par les deux équations simultanées $x = az + p$, $y = bz + q$. Si deux droites sont parallèles, leurs projections le sont aussi et les équations de la seconde droite seront $x = az + p'$, $y = bz + q'$.

Les droites qui passent toutes par un point, $x'y'z'$, ont pour équations :

$$x - x' = a(z - z'), \quad y - y' = b(z - z',)$$

ou $\frac{x-x'}{\cos\alpha} = \frac{y-y'}{\cos\beta} = \frac{z-z'}{\cos\gamma}$, en appelant $\alpha\beta\gamma$ les angles de la droite considérée avec les axes, ces angles $\alpha\beta\gamma$ étant liés par la relation :

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1.$$

Droite passant par deux points :

$$x - x' = \frac{x'' - x'}{z'' - z'}(z - z'), \quad y - y' = \frac{y'' = y'}{z'' - z'}(z - z').$$

Intersection d'une droite et d'un plan.

Il s'agit de résoudre le système d'équations :

$$x = az + p, \quad y = bz + q, \quad Ax + By + Cz + D = 0.$$

On a $z = -\frac{Ap + Bq + D}{Aa + Bb + C}$, $x = -a\frac{Ap + Bq + D}{Aa + Bb + C} + p$, $y = -b\frac{Ap + Bq + D}{Aa + Bb + C} + q$.

Si x, y, z sont infinies, la droite est parallèle au plan, et la condition de parallélisme est $Aa + Bb + C = 0$.

Angles d'une droite avec les axes de coordonnées.

On mène une parallèle $x = az$, $y = bz$ par l'origine à la droite donnée; sur cette parallèle on prend une longueur $OM = 1$, les coordonnées du point M sont donc $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$, et l'on a pour déterminer α, β, γ, les équations :

$$\cos\alpha = a\cos\gamma, \quad \cos\beta = b\cos\gamma, \quad \text{avec} \quad \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1,$$

d'où $\cos\alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2+1}}$, $\cos\beta = \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2+1}}$, $\cos\gamma = \frac{1}{\sqrt{a^2+b^2+1}}$.

L'angle θ de deux droites est l'angle de leurs parallèles menées par l'origine, et l'on a :

$$\cos\theta = \cos\alpha\cos\alpha' + \cos\beta\cos\beta' + \cos\gamma\cos\gamma' = \frac{aa' + bb' + 1}{\sqrt{a^2+b^2+1}\sqrt{a'^2+b'^2+1}}.$$

NOTIONS SUR LES SURFACES DU SECOND DEGRÉ.

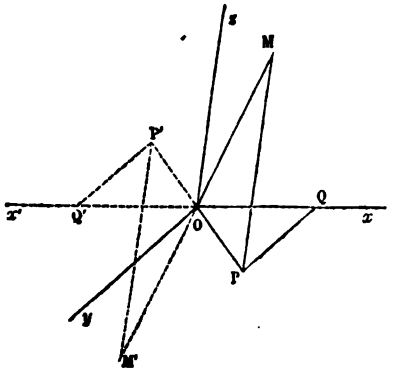
L'équation générale du second degré à trois variables est :

$$Ax^2 + A'y^2 + A''z^2 + 2Byz + 2B'xz + 2B''xy + 2Cx + 2C'y + 2C''z + K = 0;$$

elle renferme dix termes et par conséquent neuf paramètres arbitraires; d'où neuf conditions sont nécessaires et suffisantes pour déterminer une surface du 2e degré.

Nous distinguerons les surfaces du second degré en deux grandes classes suivant qu'elles ont ou qu'elles n'ont pas de centre.

Fig. 86.



Si le centre d'une surface est pris pour origine, l'équation de cette surface ne change pas quand on change xyz en $-x, -y, -z$, et réciproquement.

Cette notion se déduit immédiatement de l'inspection de la figure précédente, en remarquant que le point M situé sur le prolongement de OM et à une distance $OM' = OM$ est un point de la courbe puisque l'origine O est centre de cette courbe.

Sans entrer dans le détail des calculs nous dirons que le centre d'une surface du second degré est donné par les trois équations $f_x' = 0, f_y' = 0, f_z' = 0$, ce qui est analogue à ce que nous avons vu pour les courbes du 2e degré.

Plans diamétraux. Si l'on considère toutes les cordes parallèles à une direction donnée, la surface qui partage toutes ces cordes en deux parties égales est une surface diamétrale et pour les surfaces du second degré, la surface diamétrale est un plan. Les plans diamétraux correspondant à la direction $x = mz$, $y = nz$, ont pour équation $mf_x' + nf_y' + f_z' = 0$.

Tous les plans diamétraux passent par le centre et dans le cas où la surface n'admet pas de centre ou admet un centre situé à l'infini, les plans diamétraux sont parallèles entre eux. Dans le cas où la surface admet une infinité de centres en ligne droite (cylindre), les plans diamétraux contiennent la ligne des centres.

Diamètre. Si l'on fait une série de sections par des plans parallèles dans une surface du second degré, les centres de ces sections sont sur une ligne droite appelée diamètre de la surface.

Plans principaux. Parmi les plans diamétraux des surfaces du 2e degré, on distingue les plans principaux qui sont perpendiculaires à leurs cordes. Ce sont des plans de symétrie de la surface.

Les surfaces à centre, rapportées à leurs trois plans principaux ont pour équation générale $Px^2 + P'y^2 + P''z^2 = H$.

Les surfaces dépourvues de centre, rapportées à leurs deux plans principaux ont pour équation générale $P'y^2 + P''z^2 = Qx$.

DISCUSSION DES SURFACES A CENTRE.

$$Px^2 + P'y^2 + P''z^2 = H.$$

I. *Ellipsoïde.* Si P.P'.P'' sont du même signe, on peut toujours les supposer positifs. Et alors si H est négatif, la surface est imaginaire; si H est nul, la surface se réduit au point $x = 0, y = 0, z = 0$, c'est-à-dire à l'origine. Supposons H positif, la surface sera une ellipsoide qui, en posant :

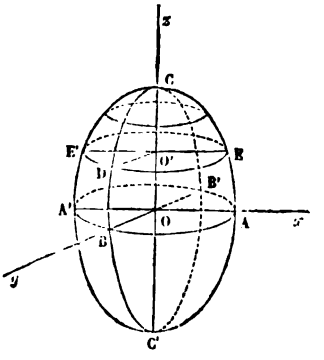
$$a = \sqrt{\frac{H}{P}}, \quad b = \sqrt{\frac{H}{P'}}, \quad c = \sqrt{\frac{H}{P''}},$$

pourra se mettre sous la forme simple :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

La figure ci-jointe représente la surface; elle coupe chaque plan de projection suivant une ellipse rapportée à ses axes. La section de la surface par un plan quelconque est une ellipse. Les trois plans de coordonnées sont des plans diamétraux, et les trois axes de coordonnées sont des axes de la surface.

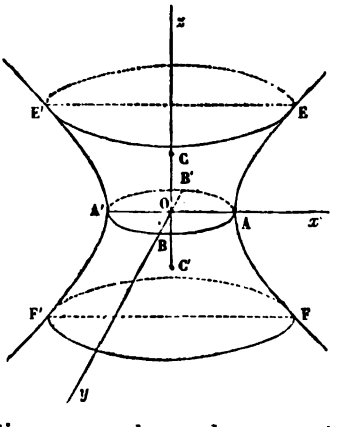
Fig. 87.



Si l'on fait $z = k$, on obtient pour section une ellipse $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 - \frac{k^2}{c^2}$, et l'on voit que l'ellipsoïde peut se considérer comme engendré par une ellipse qui se meut parallèlement au plan xy, dont le centre parcourt l'axe zz' et dont les extrémités des axes EE', DD' s'appuient constamment sur les ellipses directrices CAC', CDC'.

Si deux des axes a et b sont égaux, on voit que la section par le plan xy et par tout plan parallèle à xy est un cercle, la surface peut se considérer comme engendrée par la demi-ellipse CAC' tournant autour de son axe CC'; l'ellipsoïde est de révolution. Si les trois axes a, b, c sont égaux, l'ellipsoïde se réduit à une sphère.

Fig. 88.



II. *Hyperboloïde à une nappe.*

Si les trois coefficients p, p', p'' de l'équation du deuxième degré ne sont pas de même signe, nous pourrons ramener l'équation à la forme $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ ou à la forme

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

Étudions d'abord la surface $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$; c'est l'hyperboloïde à une nappe représenté par la figure ci-jointe. La section par xy ou par un plan parallèle à xy, $z = c$ est une ellipse; la section par des plans contenant l'axe des z est toujours une hyperbole, et la section par un plan quelconque est tantôt une ellipse, tantôt une hyperbole, tantôt un système de deux droites (cas particulier de l'hyperbole). L'ellipse AA' est l'ellipse de gorge. On peut considérer l'hyperboloïde à une nappe comme engendré par une ellipse dont le plan reste parallèle à xy, dont le centre décrit l'axe zz' et dont les axes s'appuient par leurs extrémités sur deux hyperpoles situées l'une dans le plan xz, l'autre dans le plan yz.

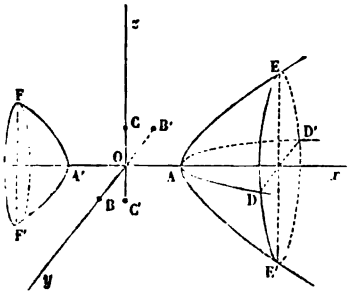
Si $a = b$, l'hyberboloïde est de révolution, et AA' est le cercle de gorge.

III. *Hyperboloïde à deux nappes.*

L'équation $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ représente une surface qui est coupée par les plans xy et xz suivant des hyperboles, et par tout plan perpendiculaire à l'axe ox suivant des ellipses. Si l'on construit $oA = oA' = a$, on voit que, dans l'intervalle compris entre les plans menés parallèlement au plan yz par les points A et A', il n'y a pas de points réels de la surface. Nous sommes en face de l'hyperboloïde à deux nappes.

Ces trois cas contiennent tous les surfaces à centre. Il se présente des cas particuliers; si H est nul, l'hyperboloïde à une nappe devient $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=0$, et cette surface est un cône dont l'axe est l'axe oz. Le plan des xz coupe ce cône suivant deux droites $\frac{x^2}{a^2}-\frac{z^2}{c^2}=0$, et le plan des yz le coupe suivant les deux droites $\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=0$.

Fig. 89.



Si nous considérons l'hyperboloïde correspondant à ce cône, on voit que les génératrices du cône sont précisément les asymptotes des hyperboles obtenues en coupant l'hyperboloïde par des plans passant par l'axe des z. Le cône considéré s'appelle, pour cette raison, cône asymptote de l'hyperboloïde, et ces deux surfaces se rapprochent d'aussi près qu'on le veut.

Le cône $\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=0$ est le cône asymptote de l'hyperboloïde à deux nappes; son axe n'est point l'axe oz, mais l'axe ox.

L'équation $Px^2+Py^2=H$, cas particulier de l'équation des surfaces à centre, représente un cylindre parallèle à l'axe oz et à base elliptique ou hyperbolique, suivant que P et P′ sont de même signe ou de signe contraire.

Génératrices rectilignes de l'hyperboloïde à une nappe.

Une propriété curieuse de l'hyperboloïde à une nappe est qu'en chaque point de cette surface il passe deux droites contenues tout entières sur la surface. En effet, l'équation $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{b^2}=1$ peut se mettre sous la forme

$$\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=1-\frac{x^2}{a^2} \quad \text{ou bien} \quad \left(\frac{y}{b}-\frac{x}{c}\right)\left(\frac{y}{b}+\frac{z}{c}\right)=\left(1-\frac{x}{a}\right)\left(1+\frac{x}{a}\right),$$

et cette équation peut s'obtenir par l'élimination de λ entre les deux équations

$$\frac{y}{b}+\frac{z}{c}=\lambda\left(1+\frac{x}{a}\right), \quad \frac{y}{b}-\frac{z}{c}=\frac{1}{\lambda}\left(1-\frac{x}{a}\right),$$

ou par l'élimination de μ entre les deux équations

$$\frac{y}{b}+\frac{z}{c}=\mu\left(1-\frac{x}{a}\right) \quad \text{et} \quad \frac{y}{a}-\frac{z}{c}=\frac{1}{\mu}\left(1+\frac{x}{a}\right).$$

Ces deux groupes d'équations représentent deux systèmes de droites qui toutes seront situées sur l'hyperboloïde.

On démontre que les deux droites λ et λ' d'un même système ne sont jamais dans un même plan, et, qu'au contraire, deux droites λ et μ de système différent sont toujours dans un même plan.

Toutes les droites situées sur l'hyperboloïde, transportées au centre parallèlement à elles-mêmes, coïncident avec les génératrices du cône asymptote; c'est ce qui ressort des équations précédentes.

On démontre qu'une droite, qui se meut en s'appuyant sur trois droites fixes non situées deux à deux dans un même plan, engendre une hyperboloïde à une

nappe. Il est facile de voir encore qu'une droite qui tourne autour d'un axe fixe qu'elle ne rencontre pas et auquel elle n'est pas parallèle, décrit un hyperboloïde de révolution à une nappe.

SURFACES DÉNUÉES DE CENTRE.

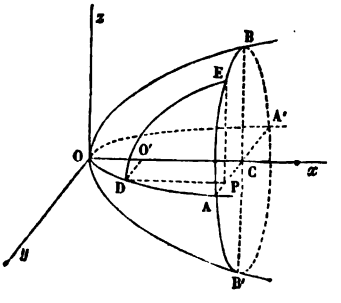
Les surfaces dénuées de centre sont comprises dans l'équation générale

$$P'y^2 + P''z^2 = Qx.$$

Un des coefficients P″, par exemple, peut être de même signe que P′ et Q, ou de signe contraire. Donc, deux cas à distinguer.

I. *Paraboloïde elliptique.* (P′, P″ et Q de même signe.)

Fig. 90.



La surface passe à l'origine et elle n'admet pas de points du côté des x négatifs, puisque $P'y^2 + P''z^2$ est toujours positif.

Pour $z = 0$, $y^2 = \frac{Q}{P'}x = 2px$, l'intersection par le plan xy est une parabole ayant pour axe l'axe ox; pour $y = 0$, $z^2 = \frac{Q}{P''}x = 2p'x$, et l'intersection par le plan des xz est encore une parabole ayant pour axe l'axe ox. L'axe ox est l'axe de la surface; les plans xy et xz sont des plans diamétraux. Toute section par un plan perpendiculaire à ox est une ellipse. Cette ellipse donne la génération de la surface, dont l'équation simplifiée est $\frac{y^2}{p} + \frac{z^2}{p'} = 2x$. La surface n'admet comme sections planes qu'ellipses et paraboles.

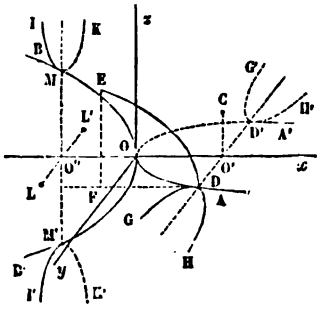
II. Paraboloïde hyperbolique (P′ et Q > 0, P″ < 0).

L'équalion simplifiée prend la forme

$$\frac{y^2}{p} - \frac{z^2}{p'} = 2x.$$

La surface s'étend à l'infini de chaque côté de l'origine. Le plan xy la coupe suivant une parabole A′oA; le plan xz suivant une parabole, dirigée en sens inverse de la première BoB′; le plan yz suivant deux droites $\frac{y^2}{p} - \frac{x^2}{p'} = 0$ passant à l'origine. Un plan parallèle à xy, $z = c$, donne une section parabolique qui n'est autre que la parabole AoA′ transportée parallèlement à elle-même le long de la parabole BoB′. Un plan parallèle à xz, $y = c$ donne une section parabolique qui n'est autre que la parabole BoB′ transportée parallèlement à elle-même le long de la parabole AoA′. Un plan parallèle à yz, $x = c$ donne pour section une hyperbole ayant pour axe DD′. La surface n'admet comme sections planes que

Fig. 91.



des paraboles et des hyperboles, d'où le nom de paraboloïde hyperbolique.

Comme cas particulier des surfaces dénuées de centre se présente le cylindre parabolique $P'y^2 = Qx$.

Génératrices rectilignes du paraboloïde hyperbolique.

En tout point de ce paraboloïde passent deux droites qui sont contenues tout entières sur la surface. En effet, l'équation $\frac{y^2}{p} - \frac{z^2}{p'} = 2x$ peut se mettre sous la forme $\left(\frac{y}{\sqrt{p}} + \frac{z}{\sqrt{p'}}\right)\left(\frac{y}{\sqrt{p}} - \frac{z}{\sqrt{p'}}\right) = 2x$, et cette équation peut s'obtenir par l'élimination de λ entre les deux équations

$$\frac{y}{\sqrt{p}} + \frac{z}{\sqrt{p'}} = 2\lambda x \quad \text{et} \quad \frac{y}{\sqrt{p}} - \frac{z}{\sqrt{p'}} = \frac{1}{\lambda},$$

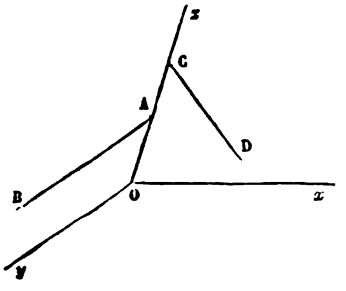
ou par l'élimination de μ entre les deux équations

$$\frac{y}{\sqrt{p}} + \frac{z}{\sqrt{p'}} = \mu, \quad \frac{y}{\sqrt{p}} - \frac{z}{\sqrt{p'}} = \frac{2x}{\mu}.$$

On démontre que deux droites λ et λ' d'un même système ne sont jamais dans un même plan, et que, au contraire, deux droites λ et μ de système différent sont toujours dans un même plan.

Les droites du premier système sont comprises dans un plan $\frac{y}{\sqrt{p}} - \frac{z}{\sqrt{p'}} = \frac{1}{\lambda}$ parallèle au plan $\frac{y}{\sqrt{p}} - \frac{z}{\sqrt{p'}} = 0$; les droites du deuxième système sont comprises dans un plan $\frac{y}{\sqrt{p}} + \frac{z}{\sqrt{p'}} = \mu$, parallèle au plan $\frac{y}{\sqrt{p}} + \frac{z}{\sqrt{p'}} = 0$. Ainsi les génératrices de chaque système sont parallèles à un plan fixe, dit plan directeur passant par l'axe *oz*. L'ensemble des plans directeurs est donné par le premier membre de l'équation $\frac{y^2}{p} - \frac{x^2}{p'} = 0$. Comme réciproque des relations précédentes,

Fig. 92.



On démontre que: lorsqu'une droite glisse sur trois droites *oy*, AB, CD parallèles à un même plan, mais non situées deux à deux dans un même plan, elle engendre un paraboloïde hyperbolique.

TANGENTE A UNE COURBE DE L'ESPACE.

Une courbe de l'espace est donnée par l'intersection de deux surfaces $F(x, y, z) = 0$ et $\varphi(x, y, z) = 0$; on peut supposer que les trois coordonnées d'un point de la courbe sont données par les équations $x = f(t)$, $y = f_1(t)$, $z = f_2(t)$, expressions dans lesquelles t est une variable indépendante à laquelle on donne une seconde valeur. Et l'on voit, en effet, que si l'on tire la valeur de t d'une de ces trois équations et qu'on la porte dans les deux autres, il reste deux équations en x, y, z dont l'ensemble représente une courbe.

Ceci posé, soit xyz un point de la courbe M, et $x+\Delta x$, $y+\Delta y$, $z+\Delta z$ le point voisin M_1, et soient t et $t+\Delta t$ les valeurs correspondantes de la variable auxiliaire. Considérons la sécante MM_1 dont XYZ sont les ordonnées courantes; une portion de cette droite a pour projections sur les trois axes les quantités $X-x$, $Y-y$, $Z-z$, et d'autre part ces projections sont proportionnelles aux quantités $\frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t}, \frac{\Delta z}{\Delta t}$; on a donc :

$$\frac{X-x}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)} = \frac{Y-y}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)} = \frac{Z-z}{\left(\frac{\Delta z}{\Delta t}\right)},$$

et lorsque Δt tend vers zéro, la sécante devient tangente, les rapports $\frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t}, \frac{\Delta z}{\Delta t}$ tendent vers les dérivées x', y', z' de xyz par rapport à t, et il en résulte que la tangente au point M est représentée par les équations

$$\frac{X-x}{x'} = \frac{Y-y}{y'} = \frac{Z-z}{z'}.$$

Plan osculateur à une courbe. Pour les courbes planes, toutes les tangentes sont dans le même plan que celui de la courbe; pour les courbes gauches, l'ensemble des tangentes forme une surface gauche dont nous aurons lieu de dire quelques mots en géométrie descriptive; imaginez une courbe gauche décomposée en une infinité d'éléments rectilignes, lesquels éléments prolongés représentent les tangentes; deux de ces tangentes, prolongements de deux côtés adjacents du polygone infinitésimal, ont un point commun, elles sont donc dans un même plan, et ce plan est ce qu'on appelle le plan osculateur de la courbe au point considéré; c'est le plan qui contient trois points infiniment voisins de la courbe, et c'est par cette définition qu'on le calcule en analyse. Si l'on considère tous les plans passant par une tangente à la courbe, le plan osculateur est parmi eux et l'on voit qu'il a avec la courbe un contact plus intime que tous les autres, on dit qu'il est osculateur de la courbe (du latin *oscula*, baiser).

Plan tangent à une surface. Sur une surface quelconque $f(x, y, z) = 0$, traçons une courbe et une sécante à cette courbe. Les deux coordonnées x et y d'un point de cette courbe sont des fonctions de la troisième coordonnée z (qui remplace la variable auxiliaire t de plus haut), les valeurs de x, y, z vérifient la relation $f(xyz) = 0$, et les dérivées x', y' de xy par rapport à z vérifieront l'équation (1) $\quad x'f'_x + y'f'_y + f'_z = 0.$

D'autre part la tangente, qui est la limite de la sécante considérée, a pour équation

$$\frac{X-x}{x'} = \frac{Y-y}{y'} = \frac{Z-z}{z'},$$

et l'équation (1) peut s'écrire :

$$(2) \qquad (X-x)f'_x + (Y-y)f'_y + (Z-z)f'_z = 0,$$

dans laquelle les deux paramètres variables x' et y' ont disparu. Par suite la surface que représente l'équation (2) est le lieu de toutes les tangentes aux courbes tracées sur la surface par le point x, y, z; or cette surface est un plan qu'on appelle plan tangent. Donc les tangentes à toutes les courbes tracées sur

une surface par un point donné sont dans un même plan. Il est facile de démontrer géométriquement ce théorème, qui nous servira souvent en géométrie descriptive.

Courbure des lignes planes.

La courbure totale d'un arc de courbe, qui ne présente pas d'inflexion entre ses deux extrémités, est l'angle formé par les tangentes extrêmes de cet arc. On comprend bien que cet angle peut mesurer la courbure, c'est-à-dire la plus ou moins grande vitesse avec laquelle l'arc s'infléchit. Ainsi, pour une ligne droite, cet angle est nul et la courbure l'est aussi ; si l'on prend sur des circonférences de rayon différent un arc de longueur constante, l'angle des tangentes extrêmes sera d'autant plus grand que le rayon du cercle sera plus petit, la courbure sera d'autant plus grande que le rayon sera plus petit, et c'est bien là ce que l'esprit conçoit.

La courbure moyenne est, par définition, le rapport de la courbure totale à la longueur de l'arc considéré. Si l'on suppose que l'arc devienne de plus en plus petit, sa courbure moyenne tend vers une limite que l'on nomme courbure de la courbe au point auquel l'arc tend à se réduire.

Rien n'est plus facile que de calculer d'après cette définition la courbure d'un arc dont l'équation $y = \varphi(x)$ est donnée.

La tangente au point x, y fait avec l'axe des x un angle α tel que

$$\text{tang}\,\alpha = \frac{dy}{dx} \quad \text{ou} \quad \alpha = \text{arc tang}\left(\frac{dy}{dx}\right).$$

L'angle de deux tangentes consécutives est la différence entre $(\alpha + d\alpha)$ et α; cet angle est donc : $d\alpha = d\left(\text{arc tang}\,\frac{dy}{dx}\right)$, et en appliquant la règle de différentiation qui donne pour la dérivée de $(\text{arc tang}\, y)$ la valeur $\frac{y'}{1+y^2}$, on trouve :

$$d\alpha = \frac{d\left(\frac{dy}{dx}\right)}{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \frac{\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)dx}{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}.$$

D'autre part, si (ds) est l'arc infiniment petit de la courbe, on a

$$\overline{ds}^2 = dx^2 + dy^2 \quad \text{ou} \quad ds = dx\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}.$$

La courbure, qui est le rapport de l'angle des tangentes à l'arc, a donc pour valeur

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}};$$

telle est l'expression simple qui permet de calculer la courbure d'une courbe dont l'équation est donnée.

Si la courbe considérée est un cercle, l'angle de deux tangentes est égal à l'angle au centre correspondant. La courbure moyenne est donc, quel que soit l'arc considéré, le rapport de cet arc à son angle au centre ; or ce rapport est constant et égal au rayon du cercle. Donc la courbure d'un cercle, qui est l'inverse du rapport précédent, est mesurée par l'inverse du rayon. Si le rayon est

infini, la courbure est nulle, et en effet, le cercle se réduit à une droite; si le rayon du cercle va sans cesse en diminuant jusqu'à s'annuler, la courbure augmente jusqu'à l'infini. Un point a une courbure infinie.

D'après cela, quelle que soit la courbure d'une courbe en un point, on peut toujours concevoir un cercle qui la touche, et dont le rayon soit donné par l'équation

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad \text{d'où} \quad \rho = \frac{\left[1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)}.$$

Ce cercle tangent à la courbe considérée, ayant sa convexité dans le même sens et un rayon égal au rayon de courbure de la courbe, se nomme son cercle de courbure. On conçoit sans peine de quelle importance peut être, en géométrie pure aussi bien qu'en géométrie appliquée, la considération du cercle de courbure, cercle par lequel on peut remplacer la courbe sur une certaine longueur de chaque côté du point de contact.

Le centre du cercle de courbure est la limite du point d'intersection de deux normales infiniment voisines.

Le cercle de courbure est en même temps le cercle osculateur de la courbe, c'est-à-dire que, parmi tous les cercles tangents à la courbe en un point déterminé, le cercle de courbure est celui qui tend le plus à se confondre avec la courbe.

Développées et développantes. La développée d'une courbe est l'enveloppe de ses normales. Définissons d'abord l'enveloppe d'une courbe : soit $\varphi(x.y.a)=0$ l'équation d'une courbe plane, dans laquelle entre un paramètre arbitraire (a); supposons qu'on donne à ce paramètre une série de valeurs croissant par petits intervalles, il en résultera une série de courbes voisines; les points d'intersection de chaque courbe avec la courbe voisine formeront les sommets d'un polygone curviligne dont chaque côté sera un petit arc appartenant à l'une des courbes. La limite de ce polygone est évidemment une ligne tangente à toutes les courbes proposées et passant par l'intersection de chacune d'elles avec la courbe infiniment voisine.

Cherchons l'équation de l'enveloppe des courbes données par l'équation $\varphi(x.y.a)=0$; un point de l'enveloppe est donné par l'intersection des deux courbes voisines (1) $\varphi(x.y.a)=0$, (2) $\varphi(x, y, a+da)=0$; on peut remplacer ce système d'équation par le suivant :

$$(1)\quad \varphi(x.y.a)=0, \quad (3)\quad \frac{\varphi(x, y, a+da)-\varphi(x\cdot y\cdot a)}{da}=0,$$

lequel devient à la limite (1) $\varphi(x.y.a)=0$ et $\varphi'_a(x\cdot y\cdot a)=0$. Entre ces deux équations, on élimine (a) et l'on a une relation en x et y qui représente l'enveloppe cherchée.

On comprendra maintenant la définition que nous avons donnée de la développée d'une courbe : c'est l'enveloppe des normales de cette courbe. C'est par suite le lieu des intersections successives de deux normales infiniment voisines, c'est-à-dire le lieu des centres de courbure de la courbe proposée. Une courbe n'a donc qu'une seule développée. La développée d'un cercle est son centre : nous engageons le lecteur à tracer soit une ellipse, soit une parabole, et à mener

une série de normales à ces courbes : les intersections successives de ces normales indiqueront le profil des développées.

La développante d'une courbe est une courbe qui coupe à angle droit toutes les tangentes de la première. Il n'est pas évident *à priori* que toute courbe ait une développante; mais s'il y en a une, il y en a une infinité qui sont toutes parallèles à la première, car ces courbes parallèles ont même normale. La seule développante usitée dans la pratique est la développante de cercle. Il est facile de construire cette développante en menant une tangente au cercle, et faisant ensuite rouler cette tangente sur le cercle; le point de cette droite, qui était en contact avec le cercle lors de la position initiale décrit une développante : les distances de ce point fixe aux points de contact successifs, distances comptées sur la tangente, sont égales à la longueur des arcs qui séparent le point de contact actuel du point de contact initial. Cette définition permet de construire la développante par points.

Courbure des courbes non planes. La définition de la courbure totale et moyenne des courbes gauches est la même que celle des courbes planes. En un point donné, considérons le plan osculateur d'une courbe gauche, et projetons cette courbe sur ce plan : la projection a un cercle osculateur qui est son cercle de courbure, et l'on démontre que, parmi tous les cercles qui touchent la courbe gauche, celui qui s'en approche le plus et tend à se confondre avec elle est précisément le cercle de courbure de la projection de la courbe sur son plan osculateur.

Ce cercle est dit cercle osculateur de la courbe gauche, et son rayon est le rayon de courbure de la courbe.

Si l'on considère la tangente en un point d'une courbe gauche et le plan mené par ce point perpendiculairement à la tangente, toutes les droites du plan sont perpendiculaires à la tangente c'est-à-dire normales à la courbe. Le plan normal rencontre le plan osculateur suivant une droite qui est la normale principale à la courbe et dont la direction est celle du rayon de courbure.

Des lignes de courbure d'une surface. Leurs propriétés principales.

Si l'on considère en un point quelconque d'une surface courbe la normale à cette surface, et les normales à tous les points voisins du premier, et si l'on veut passer à un point infiniment voisin du premier dont la normale soit dans le même plan que la première, et la rencontre par conséquent en un point, on peut toujours le faire dans deux directions; il est remarquable que ces deux directions sont à angles droits sur la surface, et qu'elles sont les seules à donner ce résultat remarquable. Il faut en excepter cependant la surface de la sphère, pour laquelle les normales sont toujours deux à deux dans un même plan puisqu'elles passent au centre; il faut en excepter aussi des points singuliers que présentent certaines surfaces, et qui jouent le rôle d'un élément de sphère; ces points singuliers s'appellent des ombilics, les sommets des surfaces de révolution en sont un exemple.

Les deux points, auxquels chaque normale est rencontrée par les deux normales infiniment voisines, sont les centres principaux de courbure de la surface au point considéré; les rayons correspondants sont les rayons de courbure principaux, et les directions rectangulaires suivant lesquelles on passe de la normale aux deux normales consécutives qui la coupent, sont les directions des courbures principales.

Si l'on conçoit que le point de la surface se meuve de manière qu'à chaque instant il suive toujours la courbure dirigée suivant un certain sens, il engen-

drera une ligne de courbure de la surface; en tout point de la surface, on trouvera une ligne de courbure de ce premier système : la direction rectangulaire donnera pour chaque point la ligne de courbure du second système. Une ligne du second système coupe à angle droit toutes celles du premier système et réciproquement : elles sont trajectoires orthogonales les unes des autres. L'ensemble des lignes de courbure divise l'aire de la courbe en éléments, qui sont tous rectangulaires.

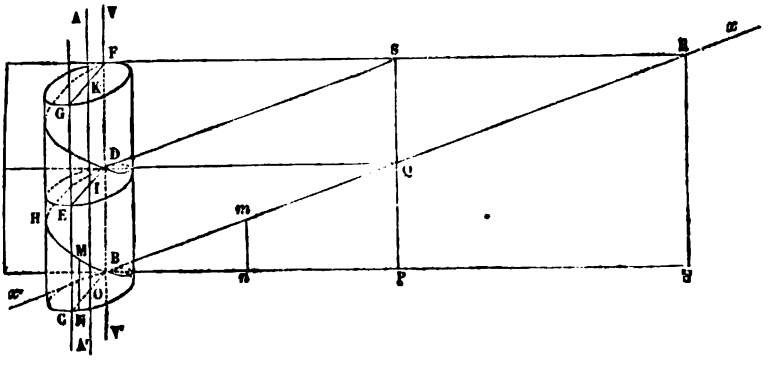
Il est facile de concevoir les deux systèmes de lignes de courbure en prenant pour exemple les surfaces de révolution. On ne peut sur une surface de révolution passer d'un point à un autre dont la normale rencontre la normale du premier, à moins qu'on ne suive soit le méridien, soit le parallèle qui passe au point considéré. Dans toute autre direction, les normales ne se rencontreraient pas puisqu'elles seraient situées dans des méridiens différents et de plus ne rencontreraient pas l'axe au même point. Un méridien est perpendiculaire à tous les parallèles de la surface, et réciproquement un parallèle est perpendiculaire à tous les méridiens. Les deux séries de courbes, méridiens et parallèles divisent la surface en petits éléments qu'on peut regarder comme rectangulaires.

Nous aurons occasion de reparler de ces propriétés des lignes de courbure, lorsque nous nous occuperons de la coupe des pierres.

Des hélices. L'hélice est une courbe que l'on rencontre trop souvent pour que nous n'en donnions pas ici les propriétés principales.

On appelle surface cylindrique ou cylindre une surface engendrée par une droite qui se meut parallèlement à elle-même en s'appuyant sur une courbe fixe : lorsque la courbe fixe est un cercle, le cylindre est circulaire, et si de plus la direction de la génératrice est perpendiculaire au plan du cercle le cylindre est droit à base circulaire. Les sections parallèles à la base sont des cercles dont tous les centres sont sur l'axe.

Fig. 93.



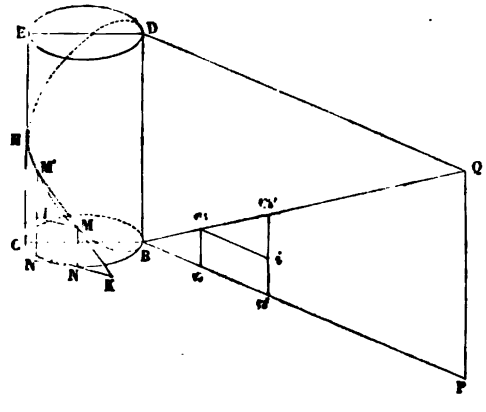
Soit AA' l'axe du cylindre; menons suivant la génératrice BD un plan, et supposons le cylindre coupé suivant cette génératrice et développé sur le plan (nous verrons en géométrie descriptive qu'un cylindre peut s'étendre sur un plan sans déchirure ni duplicature); la circonférence de base BC se développe suivant une droite BP perpendiculaire à la génératrice DB; la droite DQ égale à la première est le développement de la base supérieure DE du cylindre, de sorte que le cylindre se développe suivant le rectangle BPQD. Menons la diagonale BQ du rec-

tangle, et supposons maintenant qu'on l'enroule sur le cylindre, la droite BQ se transformera en une ligne à double courbure qu'on appelle hélice. L'hélice est indéfinie, car si l'on suppose la ligne BQ prolongée et qu'on prolonge indéfiniment au delà de 360° l'enroulement du plan sur le cylindre la droite donnera une courbe indéfinie : les longueurs telles que BD interceptées sur une génératrice par cette courbe sont égales entre elles. La portion BMHD de courbe comprise entre les points B et D est une spire : toutes les spires sont égales.

Le pas de l'hélice est le rapport de la hauteur PQ d'une spire à la circonférence BP sur laquelle elle se projette. On comprend ce que veut dire un pas de $\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}$. On a le rapport $\frac{mn}{nB} = \frac{QP}{PB} = \frac{h}{2\pi r}$ = le pas. Donc si l'on détermine un point de l'hélice au moyen des deux coordonnées suivantes : 1° l'arc BN de la base du cylindre; 2° la hauteur NM de génératrice interceptée entre la base et la courbe, l'hélice a pour équation $\frac{NB}{MN}$ = constante.

Tangente à l'hélice. Si a est le pas de l'hélice, son équation sera $y = hx$, les x étant comptés sur la circonférence voisine. Pour deux points voisins M et M' de la courbe, on peut supposer que le plan MM'I se confond avec un élément de la surface du cylindre, et que la droite MI est égale à l'arc NN'.

Fig. 94.

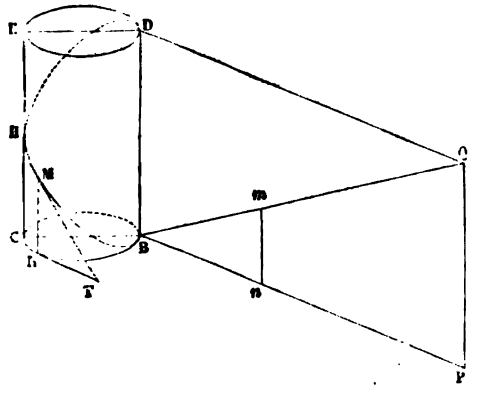


Donc si (α) est l'angle de la tangente avec le plan de la base, on aura

$$\text{tang}\alpha = \lim \frac{M'I}{MI} = \frac{dy}{dx} = h;$$

donc l'angle α est constant et égal à l'angle QBP qui a aussi pour tangente le rapport $\frac{PQ}{PB} = h$. L'angle de la tangente à l'hélice avec le plan de base est constant et égal à l'angle que fait la droite transformée de l'hélice avec la transformée de la base.

Fig. 95.

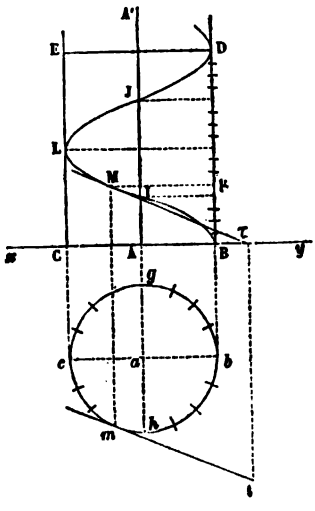


La sous-tangente NT est donc égale à l'arc BN, car le triangle MNT est égal à mnB. Il résulte aussi que le pied T de la tangente à l'hélice se meut sur la développante du cercle de base dont l'origine est en B.

Projection de l'hélice sur un plan perpendiculaire à la base du cylindre.

Soit xy la ligne de terre : on divise la base (bc) en un certain nombre de parties égales, et la hauteur BD d'une spire en un même nombre de parties égales.

Fig. 96.



Par les points de division de la base on mène des verticales, et par les points de division de la hauteur on mène des sections droites du cylindre qui se projettent suivant des parallèles à la ligne de terre xy. Les points tels que M, intersection d'une verticale et d'une horizontale ayant même numéro d'ordre, appartiennent, d'après l'équation de l'hélice, à sa projection verticale. Cette projection est une sinusoïde dont AA' est l'axe.

Hélicoïdes gauches. Les hélices servent de directrice à des surfaces gauches très-usitées dans la pratique et qui sont des hélicoïdes gauches.

Imaginez une hélice tracée sur un cylindre, et une droite qui se meut en s'appuyant, 1° sur l'hélice, 2° sur l'axe du cylindre, et en faisant avec cet axe un angle constant ; cette droite engendre ce qu'on appelle la surface de vis à filet triangulaire. Lorsque la droite génératrice qui s'appuie sur l'ellipse et sur l'axe rencontre celui-ci normalement, on a la surface de vis à filet carré : cette surface peut encore être engendrée par une droite qui se meut en s'appuyant, 1° sur l'hélice, 2° sur l'axe du cylindre en restant parallèle au plan de base du cylindre.

La vis à filet triangulaire est engendrée par un triangle isocèle, dont le plan est normal à la surface d'un cylindre droit, et dont la base repose sur une génératrice de ce cylindre. On donne à ce triangle un mouvement hélicoïdal, c'est-à-dire qu'il se meut en restant normal au cylindre, et de telle sorte que pour un point donné le rapport de la hauteur à l'arc parcouru par la projection sur le plan horizontal soit constant. Les deux sommets de base décrivant des hélices égales et parallèles, le sommet opposé décrit une hélice égale et parallèle aux deux autres. Les côtés du triangle isocèle engendrent des surfaces de vis à filet triangulaire. Le pas de la vis est le pas du mouvement hélicoïdal.

La vis à filet carré est engendrée par un rectangle accolé à une génératrice d'un cylindre droit normalement à ce cylindre et animé d'un mouvement hélicoïdal : les deux côtés horizontaux engendrent des surfaces de vis à filet carré, et le côté vertical engendre un cylindre.

Les hélices tracées sur un cylindre sont sinistrorsum ou dextrorsum suivant que, pour un observateur placé suivant l'axe du cylindre, l'enroulement de la droite BQ se fait de gauche à droite ou de droite à gauche. La même distinction est à faire pour tout mouvement hélicoïdal.

MANUEL

DE L'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

PROGRAMME

DE L'EXAMEN DES CANDIDATS AU GRADE D'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉE

APPLICATION DE LA GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE

I. *Coupe des pierres.* — Principales formes des murs et des voûtes.

Taille de la pierre par équarrissements, par panneaux. — Tracé et vérification des épures d'exécution.

Appareils des murs en aile, des avant-becs et couronnements des piles de ponts.

Appareil des berceaux droits, en talus, légèrement biais; des berceaux en descente. — Appareil hélicoïdal des arches biaises. — Appareil des voûtes à intrados gauche; des voûtes sphériques. — Pénétration de voûtes.

II. *Charpente.* — Composition d'un pan de bois, d'un comble, d'un escalier, de la ferme d'un cintre ou d'un pont. — Divers modes d'assemblage, d'enture et de liaison, suivant la nature des efforts que supportent les pièces. — Tracé et vérification des épures d'exécution.

TABLE DES MATIÈRES

GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE.

NOTIONS SUR LES SURFACES.

pages

Génération des surfaces. 99
Surfaces de révolution. 100
Id. développables. 100
Id. gauches. 101

PLANS TANGENTS.

Plans tangents à un cylindre. 102
Id. à un cône. 103
Id. à une surface de révolution. . . 103

INTERSECTION DE SURFACES.

Intersection d'un cylindre et d'un plan. 104
Id. d'un ellipsoïde et d'un plan. . . . 105
Id. de deux cylindres. 106
Plans cotés. 107
Surfaces topographiques. 107
DE LA STÉRÉOTOMIE. 108

COUPE DES PIERRES.

Des murs. 109
Des voûtes. 109
Tracé des épures. 110
Taille de la pierre. 112
Porte droite en plein cintre. 113
Porte biaise en talus rachetant un berceau cylindrique. 113
Biais passé ou corne de vache. 115
Arrière voussure de Marseille. 117

pages

Descente biaise rachetant un berceau cylindrique 118
Escalier à noyau plein. 120
Escalier en vis à jour. 121
Voûte sphérique. 122
Voûte d'arêtes. 124
Voûte en arc de cloître. 124
Appareil des arches biaises. 125

CHARPENTE.

Origine et développements de la charpente. . . 132
Assemblage droit à tenon et mortaise. 133
Id. oblique *id.* 133
Assemblage oblique à tenon et mortaise, avec embrèvement. 133
Assemblage oblique à tenon et mortaise, avec embrèvement par encastrement. 134
Assemblage à queue d'hironde. 134
Assemblage droit à tenon sur l'arête. 135
Embrèvement simple par enfourchement. . . . 135
Assemblage à oulice. 135
Id. à onglet 135
Entures. 136
Moises. 137
Pans de bois extérieurs. 138
Id. intérieurs. 139
Combles. 140
Croupe droite. 142
Croupe biaise. 143
Escaliers. 145
Balancement des marches. 146
Taille du limon. 149
Equarrissage des pièces de charpente. 150

MANUEL

DE

L'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

(DEUXIÈME SECTION)

GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE. — COUPE DES PIERRES CHARPENTE

GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE

Il n'entre point dans notre programme de traiter la géométrie descriptive proprement dite. Le lecteur doit connaître tout ce qui est relatif à la ligne droite et au plan; nous l'engageons à revoir ces notions fondamentales et à refaire lui-même toutes les épures, afin de posséder pleinement les principes. La géométrie descriptive n'offre que peu de difficultés théoriques : elle présente surtout quelques difficultés d'exécution. Étant donné une figure compliquée où se croisent une infinité de lignes, il faut s'habituer à rétablir instantanément par la pensée la figure dans l'espace. En un mot, il faut éviter toute construction machinale. C'est par un exercice soutenu, par l'étude de nombreuses épures différentes que l'on arrive à savoir parfaitement la géométrie descriptive. Pour l'étudier, il ne suffit point de lire un ouvrage en suivant sur les planches, il est indispensable de tracer soi-même l'épure indiquée dans le livre. Par ce moyen tout s'éclaircit, et ces figures qui semblent au premier abord inextricables, n'offrent plus à l'esprit qu'une image des plus nettes.

NOTIONS SUR LES SURFACES.

Génération des surfaces.

En géométrie analytique, nous avons exprimé la nature d'une surface par des relations entre les distances d'un point de cette surface à trois plans fixes. En géométrie descriptive, nous considérerons une surface comme engendrée par une

courbe qui se meut, suivant une certaine loi, avec une forme constante ou variable : cette courbe mobile est la génératrice de la surface.

Une surface est définie lorsque, pour chacun de ses points, on peut assigner la forme et la position de la ligne génératrice qui passe en ce point. De la sorte, en effet, on a des génératrices aussi nombreuses et aussi rapprochées qu'on le veut, et l'ensemble de ces lignes représente complétement la surface.

Nous ne considérerons que les surfaces usitées dans la pratique, c'est-à-dire celles qui sont engendrées par la ligne droite et le cercle. Parmi les surfaces qu'engendre le cercle, on remarque particulièrement les surfaces de révolution, qui s'exécutent au moyen de la machine-outil appelée tour.

Surfaces de révolution. D'une manière générale on appelle surface de révolution la surface engendrée par une ligne droite ou courbe, plane ou à double courbure qui tourne autour d'un axe fixe.

Tout plan passant par l'axe fixe coupe la surface suivant une section constante, dite section méridienne.

Si l'on trace sur une surface de révolution telle ligne que l'on voudra, et qu'on fasse tourner cette ligne autour de l'axe de la surface, elle décrira la surface elle-même, ce qui se comprend en remarquant que les rayons et la position respective des circonférences, dont le cercle est perpendiculaire à l'axe, ne changent pas.

Toutes les sections perpendiculaires à l'axe fixe sont des cercles ayant leur centre sur cet axe : on les appelle les parallèles de la surface.

Toutes les normales d'une surface de révolution rencontrent son axe, en effet, en tout point d'un parallèle, la tangente au parallèle est normale au méridien qui passe par le même point; or, la tangente au parallèle est une tangente à la surface, et comme la normale en un point est perpendiculaire au plan tangent, c'est-à-dire à toutes les tangentes que ce plan contient, il suit de là que la normale cherchée est perpendiculaire à la tangente au parallèle; elle est donc située dans le plan méridien et par suite rencontre l'axe de la surface.

Toutes les normales, menées aux divers points d'un même parallèle, rencontrent l'axe fixe au même point; leur ensemble forme un cône droit ayant pour base le parallèle et pour axe l'axe fixe de la surface de révolution.

Surfaces engendrées par une droite.

Il y a deux espèces de surfaces engendrées par une droite : les unes qu'on nomme surfaces développables, les autres qu'on appelle surfaces gauches, non développables.

Surfaces développables.

Une surface développable est le lieu géométrique des tangentes à une courbe à double courbure, qu'on nomme arête de rebroussement de la surface : deux tangentes consécutives correspondent à deux positions consécutives de la droite génératrice de la surface. On conçoit la surface comme formée de deux nappes qui se composent, l'une des portions de tangentes prises en deçà, et l'autre des portions prises au delà du point de contact. Les deux nappes sont séparées par l'arête de rebroussement.

Les exemples les plus simples de surfaces développables sont le cône et le cylindre. Dans le cône, l'arête de rebroussement se réduit à un point situé à distance finie, et qui est le sommet du cône; dans le cylindre, l'arête de rebroussement se réduit à un point situé à l'infini, et toutes les droites génératrices sont parallèles.

D'une manière générale, un cône est la surface engendrée par une droite qui

passe en un point fixe et s'appuie sur une courbe donnée, ou directrice. De la nature de la directrice, de la position relative du sommet et de la directrice dépend la nature du cône. Si la directrice est une courbe plane du 2e degré, le cône est lui-même du second degré; si la base est circulaire, et perpendiculaire à la ligne qui joint le sommet au centre de la base, le cône est circulaire droit, c'est un cône de révolution.

Le cylindre est la surface engendrée par une droite qui se meut parallèlement à elle-même en s'appuyant sur une courbe donnée qu'on appelle directrice; on conçoit, sans qu'il faille le dire, ce qu'est un cylindre du deuxième degré ou un cylindre de révolution.

Revenons aux surfaces développables :

Chaque élément de la surface développable est compris entre deux droites qui se coupent; c'est donc un élément plan. L'élément plan voisin peut tourner avec la surface autour de la génératrice commune aux deux éléments, jusqu'à ce qu'il s'applique sur le plan du premier élément. Le troisième élément peut de même venir s'appliquer dans le plan des deux premiers, et ainsi de suite. On voit que finalement tous les éléments de la surface se seront appliqués sur un seul et même plan, sans déchirure ni duplicature; et l'on a ce qu'on appelle le développement de la surface.

Toutes les courbes tracées sur la surface développable, et qui coupent les droites de cette surface sous des angles déterminés, se transforment sur le plan du développement en d'autres courbes qui coupent les droites de la surface développable rapportées sur ce plan, sous des angles respectivement égaux aux premiers. Toute surface peut se concevoir comme la réunion d'une infinité d'éléments plans, mais en général ces éléments plans ont toutes leurs dimensions infiniment petites; les surfaces développables sont les seules dont les éléments plans aient une dimension illimitée dans le sens des droites de la surface. Ces éléments plans prolongés dans tous les sens sont les plans tangents de la surface.

Le lieu d'un plan, mobile dans l'espace d'après une loi quelconque, est toujours une surface développable.

Surfaces gauches.

Dans une surface gauche, deux droites consécutives, quelque petite que soit leur distance, ne se rencontrent pas, et l'élément de la surface compris entre elles est un élément courbe qui a une dimension illimitée dans le sens des droites qui le comprennent. La forme de cet élément est celle d'un plan tordu ou plan gauche.

Certaines surfaces gauches sont très-régulières et très-belles : nous citerons les hyperboloïdes et paraboloïdes que nous avons étudiés en géométrie analytique.

D'une manière générale, une surface gauche est engendrée par une droite qui se meut en s'appuyant sur trois courbes données qu'on appelle directrices. Pour construire la génératrice qui passe en un point S de la directrice A, on construit les deux cônes ayant pour sommet le point S et pour bases les directrices B et C, ces deux cônes se coupent suivant des génératrices qui rencontrent évidemment B et C, et aussi A puisqu'elles passent au point S; ces génératrices s'appuient sur les trois courbes données, donc elles appartiennent à la surface cherchée.

PLANS TANGENTS.

Une surface quelconque peut se considérer comme formée d'une infinité d'éléments plans infiniment petits. Prolongez ces éléments dans tous les sens, vous aurez les plans tangents de la surface : en un point donné, le plan tangent contient les éléments rectilignes de toutes les courbes qui passent en ce point. Ainsi, les tangentes aux différentes courbes tracées sur une surface par un point donné sont comprises dans un même plan.

Pour construire ce plan, il suffira de trouver deux droites qui y soient contenues. Tel est le principe qui va nous guider dans la recherche des plans tangents.

Si l'on veut avoir le plan tangent en un point, on construit les tangentes à deux des courbes de la surface qui passent en ce point, et le plan de ces tangentes est le plan cherché. Il est clair que l'on choisit les courbes auxquelles on peut mener le plus facilement une tangente, les cercles par exemple, et mieux encore les lignes droites si la surface admet des génératrices rectilignes.

Lorsqu'il y a deux génératrices rectilignes passant en un même point, comme cela arrive pour les hyperboloïdes et paraboloïdes étudiés en géométrie analytique, le plan tangent est donné par le plan de ces deux génératrices. Pour les surfaces gauches, le plan tangent tourne autour de la génératrice, lorsque le point de contact se déplace sur cette génératrice. Pour les surfaces développables, le plan tangent est le même tout le long d'une génératrice.

Ainsi, dans un cylindre ou dans un cône, le plan tangent est le même tout le long d'une génératrice, et pour le construire il suffit de mener la tangente à la base au point où une génératrice la rencontre, et de construire le plan qui contient cette tangente et la génératrice correspondante.

Dans les surfaces de révolution, on construit en un point donné la tangente au méridien et la tangente au parallèle; le plan de ces deux droites est le plan tangent.

EXEMPLES.

Planche 1, *figure* 1. *Plan tangent à un cylindre*, dont la base située dans le plan horizontal est ABCD, le contour apparent est ECLDF sur le plan horizontal et *abgh* sur le plan vertical.

1° Si le point est situé sur le cylindre, soit K sa projection horizontale; les génératrices qui contiennent le point de l'espace ont pour projection horizontale KML, et pour projections verticales *lo* et *mo'*; le point K de l'espace se projette donc sur le plan vertical soit en *k*, soit en *k'*. — Considérons le point K*k*; la génératrice, sur laquelle il se trouve, est (*kl*, KL), et comme le plan tangent cherché est tangent tout le long de la génératrice, il en résulte que la trace horizontale de ce plan est la ligne LP, tangente en L à la base du cylindre. L'horizontale du plan, au point K*k*, est donc (KS, *ks*), et P*s* est la trace verticale du plan cherché. Le plan tangent au point (K*k'*) se construit de même, c'est le plan RQ*v*; comme vérification, l'intersection (RV, *rv*) des deux plans tangents doit être parallèle aux génératrices du cylindre.

Planche 1, *figure* 2. 2° Mener un plan tangent au cylindre par un point extérieur N*n*. Par ce point menez une droite (NV, *nv*) parallèle aux génératrices du cylindre : la trace horizontale de cette droite est le point R : du point R on mène une tangente RL à la base, elle sera la trace horizontale du plan tangent cher-

ché, et la génératrice de contact est (LO, *lo*), donc la trace verticale du plan tangent est Po. Du point R, on peut mener une autre tangente RM; il y a donc deux solutions, et les deux plans tangents se coupent suivant la droite (NV, *nv*) parallèle aux génératrices du cylindre.

Planche 1, *fig.* 3. 3° Mener un plan tangent au cylindre parallèlement à une droite donnée (UZ, *uz*). La droite (GZ, G'*z*) étant parallèle aux génératrices; la droite GU, qui joint les deux traces horizontales G et U des droites données parallèles à deux droites du plan cherché, sera parallèle à la trace horizontale du plan cherché; et cette trace sera soit PR, soit QR', tangentes menées à la base du cylindre parallèlement à GU. La génératrice du contact sera soit (LO, *lo*), soit (Mω, *m*ω'); et l'on a deux plans tangents RP*v*, R'Q*v*' qui répondent à la question.

Plans tangents à un cône.

1° Par un point K*k*' de la surface (planche 2, *fig.* 1). Soit E*e* le sommet, la génératrice qui passe en K a pour projections (EKM, *ekm*) ou bien (EKL, *ek'l*). Prenons le point (K*k*') : le plan cherché est tangent tout le long de la génératrice (EL, *el*), donc la trace horizontale de ce plan est la tangente LP à la trace horizontale du cône; alors on peut construire l'horizontale (KS, *k's*) du plan cherché et la droite P*s* est la trace verticale de ce plan. Le plan tangent passant au point K*k* est RQ*v*. Comme vérification, l'intersection des deux plans RP*v*, RQ*v* passe par le sommet du cône.

2° Par un point N*n* de l'espace (planche 2, *fig.* 2). Joignez le point donné au sommet, vous avez la droite (NE, *ne*) qui appartient au plan cherché et dont la trace horizontale est R. Le plan cherché a pour trace horizontale l'une ou l'autre des tangentes (RL, RM) à la base du cône; et l'on trouve deux solutions qui sont les plans RP*v*, RQ*v*, dont l'intersection (RV, *rv*) passe au sommet E*e* du cône.

3° Mener un plan tangent parallèle à une droite donnée (ZU, *zu*), planche 2, *fig.* 3. Par le sommet E*e*, menez une parallèle à la droite donnée, et par la trace horizontale R de cette parallèle menez RL, RM tangentes à la base du cône. Les plans tangents cherchés sont RP*v*, RQ*v*, et leur intersection est précisément la parallèle menée par le sommet à la droite donnée.

Plan tangent à une surface de révolution (planche 3).

Soit un ellipsoïde de révolution engendré par la rotation d'une ellipse tournant autour de son grand axe, qui est vertical. Le contour apparent sur le plan vertical est l'ellipse méridienne, et, sur le plan horizontal, c'est le plus grand parallèle, c'est-à-dire l'équateur de la surface.

Étant donné un point de la surface dont la projection horizontale est M, trouver sa projection verticale. Le point M est situé sur le parallèle décrit avec AM pour rayon; or le point M' a sa projection verticale en *n*' ou en *n*'', et le cercle horizontal MM' est la projection des deux parallèles passant en (*n*') et (*n*''), lesquels se projettent suivant des parallèles à la ligne de terre. Le point M a donc sa projection verticale soit en *m*, soit en *m*'. Considérons le point M*m*; le plan tangent en ce point contient la tangente au parallèle, c'est-à-dire la droite MP, *mp*, et *p* est un point de la trace verticale du plan : le plan tangent contient aussi la tangente au méridien; or, faisons tourner le méridien projeté horizontalement sur AM, de manière à le rendre parallèle au plan vertical, ce méridien se projettera suivant l'ellipse du contour apparent et le point M*m* sera venu en M'*n*'.

La tangente au méridien en M'*n*' se projette suivant *on'l*', M'L' et elle rencontre l'axe de la surface en *o*; si l'on revient à la position initiale, la figure tout entière va tourner sans se déformer, la tangente au méridien décrit un cône

droit dont le sommet est en *o*, et dont la base est le cercle décrit avec AL' pour rayon ; finalement la tangente au méridien AM sera AL, *ol*. Le point L appartient à la trace horizontale du plan cherché, et, comme on connaît une horizontale MP de ce plan, sa trace horizontale sera LQ et sa trace verticale *Qp*.

On construirait de même le plan tangent KR*s* au point M*m'*.

Les trois exemples que nous venons de donner indiquent suffisamment la marche à suivre pour construire le plan tangent en un point d'une surface quelconque.

INTERSECTIONS DE SURFACES.

Pour construire l'intersection de deux surfaces données, on se sert généralement d'une troisième surface, dite surface auxiliaire, qui coupe chacune des deux premières suivant une ligne. L'intersection des deux lignes donne des points communs aux deux surfaces. On fait varier graduellement la surface auxiliaire de manière à obtenir des points de l'intersection cherchée aussi rapprochés qu'on le veut. Il semble au premier abord que l'on ne fasse que compliquer la question : il n'en est rien, car on choisit la surface auxiliaire de manière à ce qu'elle coupe les surfaces données suivant des lignes simples et faciles à construire, des droites ou des cercles par exemple.

Ainsi, veut-on trouver l'intersection de deux cônes ? on se sert de plans auxiliaires passant par les deux sommets ; ils coupent les cônes suivant des lignes droites. S'agit-il de cylindres ? On se sert de plans parallèles aux deux systèmes de génératrices. S'agit-il d'un cône et d'un cylindre ? On se sert de plans auxiliaires passant par la parallèle aux génératrices du cylindre menée par le sommet du cône. Enfin, s'agit-il de surfaces de révolution à axes parallèles, verticaux, par exemple ? On se sert de plans horizontaux qui coupent les surfaces données suivant des cercles ; cette construction s'applique à la recherche de l'intersection de deux sphères. Dans le cas où l'on a deux surfaces de révolution à axes concourants, les surfaces auxiliaires seront des sphères concentriques décrites du point de concours des axes comme centre.

Si les surfaces ont une position irrégulière par rapport aux plans de projection, il faut effectuer un changement de plans de projection. Si les surfaces n'admettent pas de sections simples, on applique encore la méthode générale, on coupe par des plans auxiliaires : mais les épures deviennent alors longues et compliquées.

Tangente à l'intersection de deux surfaces.

La ligne intersection de deux surfaces peut fort bien se déterminer par points, mais on arrive à plus d'exactitude dans le tracé en cherchant les tangentes en divers points de l'intersection.

La tangente en un point de l'intersection de deux surfaces est la droite suivant laquelle se coupent les plans tangents aux deux surfaces au point considéré. En effet, l'intersection appartient aux deux surfaces. Sa tangente en un point est donc tout entière dans l'un et dans l'autre plan tangent, par suite elle est leur intersection même.

Intersection d'un cylindre circulaire droit par un plan (planche 4).

La base du cylindre est le cercle de diamètre AB, et son contour sur le plan vertical se compose des verticales élevées en A' et B'. Le plan sécant est (EF*a*), perpendiculaire au plan vertical ; si le plan donné n'était pas perpendiculaire au

plan vertical, il serait facile, par un changement du plan vertical de projection d'obtenir la disposition indiquée par la figure. Nous savons que la courbe d'intersection du cylindre et du plan est une ellipse projetée verticalement sur la droite *ab* et horizontalement sur le cercle de base AB du cylindre. On voit immédiatement sur la figure que la droite *ab* est le grand axe de l'ellipse. La tangente au point H*h* de l'intersection est la droite HE, *h*F dont la trace horizontale est en E.

Faisons tourner le plan sécant autour de l'horizontale projetée au point (*c*), la courbe se projettera en vraie grandeur sur le plan horizontal, et verticalement se projettera suivant la droite $\alpha'\beta' = ab = \alpha\beta$ grand axe de l'ellipse. Dans le mouvement, un point tel que H*h* décrit un arc de cercle parallèle au plan vertical et qui par suite se projette verticalement suivant l'arc *h*P et horizontalement suivant la parallèle HP' à la ligne de terre; le point P', P est un point de la courbe cherchée : le point P''P en est un autre.

Dans le mouvement, la trace horizontale EF de la tangente devient le point MM' appartenant toujours à la tangente et la droite M'P' est cette tangente, qui coupe le petit axe CD de l'ellipse au même point L que la droite EH, car le point L appartenant à l'axe de rotation ne bouge pas.

La figure représente encore le rabattement du plan sécant sur le plan vertical après une rotation autour de la droite F*g*, cette droite F*g* ayant été ensuite transportée parallèlement a elle-même en F'*g'*. Dans le mouvement, le point H, par exemple, reste toujours à la même distance HH' du plan vertical et de l'axe de rotation F*g*; ce point H viendra donc en *h'* à une distance V*h'* = HH'. Pour la tangente, la distance FE se conserve et devient F'E'; la tangente est donc E'*h'*.

Développement de l'intersection. Nous venons de trouver l'intersection, mais pour la tracer facilement sur le cylindre, il est bon d'en avoir le développement. Imaginez le cylindre recouvert d'une feuille de papier que l'on fend suivant une génératrice et que l'on développe ensuite. Si l'on peut tracer sur cette feuille développée la transformée de l'intersection, il est clair que l'on pourra ensuite très-facilement tracer l'intersection elle-même sur le cylindre en venant enrouler la feuille de papier autour de ce cylindre.

La figure (planche 4, *fig.* 2) suppose que l'on a ouvert le cylindre suivant la génératrice (B, B'*b*), et qu'on l'a développé sur le plan vertical tangent au cylindre suivant la génératrice (A, A'*a*). Le cylindre est limité au plan horizontal *ab'*. Sur l'horizontale BB', on porte à droite et à gauche du point A des longueurs AH, HC égales aux arcs du cercle, section droite du cylindre; par exemple, on obtient ainsi le point H, et le point *h*, qui appartient à la transformée de l'intersection, se trouve à une hauteur H*h* = *jh* au-dessus de l'horizontale BB'. La projection horizontale de la tangente ne change pas de longueur dans le développement, et si K est le point de rencontre de la tangente HE avec le plan vertical tangent au cylindre en A, on aura, sur le développement, la tangente au point *h* de la transformée en prenant la longueur HK égale à la longueur HK de la *fig.* 1; la ligne K*h* sera la tangente.

Intersection d'un ellipsoïde de révolution par un plan (planche 5). Le contour de l'ellipsoïde est l'ellipse méridienne sur le plan vertical et l'équateur sur le plan horizontal. Soit L*mn* le plan sécant perpendiculaire au plan vertical : prenons comme plans auxiliaires des plans horizontaux, tels que *ss'*. Ce plan *ss'* coupe l'ellipsoïde suivant le parallèle de rayon OS et le plan suivant l'horizontale projetée en *r* et en RR'. Les points R et R' d'intersection de cette droite avec le parallèle OS sont des points de la courbe cherchée. Nous avons vu en géométrie

analytique que la courbe de section est une ellipse. Cette ellipse est toute entière à l'intérieur de l'équateur auquel elle est tangente en deux points que donne le plan auxiliaire *ab*. La droite AB est un axe de l'ellipse dont il est facile sur l'épure de déterminer les extrémités. On a construit sur la figure le rabattement du plan sécant sur le plan vertical autour de la trace *mn*.

Intersection de deux cylindres (planche 6). Étant données les bases de ces deux cylindres dans le plan horizontal et la direction de leurs génératrices, il est facile de construire leurs contours apparents. Sur le plan horizontal le contour apparent est limité aux traces des plans tangents verticaux; si on mène les tangentes HH', GG' à une ellipse de base parallèlement à la projection horizontale des génératrices, ces droites HH', GG' sont précisément les traces des plans tangents verticaux, et forment le contour apparent du cylindre. Sur le plan vertical, le contour apparent est donné par les plans tangents au cylindre perpendiculaires au plan vertical; les traces horizontales de ces plans sont les tangentes FF', EE' à la base du cylindre perpendiculaires à la ligne de terre, et les traces verticales sont F'*f*, E'*e* parallèles à la projection verticale des génératrices du cylindre. Ces droites F'*f*, E'*e* limitent le contour apparent du premier cylindre.

D'après cela, nous pourrons déterminer le contour apparent des deux cylindres.

Par un point quelconque, menons une parallèle aux génératrices de chaque cylindre, et cherchons le plan qui passe par ces deux droites : tout plan parallèle à celui-là sera parallèle aussi aux deux systèmes de génératrices et coupera les cylindres suivant des génératrices. Menons une série de droites parallèles à la trace horizontale du plan ainsi construit et soit STUV une de ces droites; le plan qui a pour trace cette droite, coupe le premier cylindre suivant les génératrices $S\alpha\gamma$, $S'\alpha'\gamma'$ et $T\beta\delta$, $T'\beta'\delta'$ et le second cylindre suivant les génératrices $U\beta\alpha$, $U'\beta'\alpha'$ et $V\delta\gamma$, $V'\delta'\gamma'$: ces quatre droites par leurs intersections donnent quatre points $\alpha\alpha'$, $\beta\beta'$, $\gamma\gamma'$, $\delta\delta'$ de la courbe cherchée. On pourra construire autant de points que l'on voudra de cette courbe en faisant varier le plan auxiliaire. On voit que l'intersection se compose de deux courbes distinctes : la courbe d'entrée et la courbe de sortie. Il est utile de distinguer les parties vues et les parties cachées : pour cela, on suppose un observateur placé à l'infini en avant du plan vertical, et un autre placé à l'infini au-dessus du plan horizontal; on marque en trait plein les parties de courbes que ces observateurs peuvent apercevoir et en trait ponctué les parties cachées. On trouve les points où les courbes d'intersection sont tangentes au contour apparent en prenant les plans auxiliaires tels que D qui passent par les points de contact avec la base des génératrices du contour apparent. On trouve de même les génératrices qui limitent les courbes dans l'autre sens, en menant les plans auxiliaires tangents à celui des cylindres qui pénètre dans l'autre, c'est-à-dire les plans MNO, PQR.

Cette épure est assez chargée de lignes, et il importe, quand on l'exécute, de suivre avec précaution les différentes branches de courbe si on veut les tracer exactement.

Nous en resterons là pour ce qui touche l'intersection des surfaces : nous engageons seulement le lecteur à exécuter lui-même des épures d'intersection de surfaces faciles à imaginer : intersection de deux sphères, de deux cônes, d'une sphère et d'un cône, d'une sphère et d'un tore (le tore est la surface engendrée par la rotation d'un cercle autour d'un axe fixe situé dans son plan).

Avant d'aborder les questions de stéréotomie qui nous touchent particulièrement, nous croyons bon de dire quelques mots de diverses méthodes de représentation des figures, usitées dans des cas spéciaux.

Plans cotés. Dans la méthode des plans cotés, on ne se sert que d'une projection, et les points sont déterminés par la distance qui les sépare du plan de projection ou plan de comparaison, laquelle distance est inscrite à côté de la projection du point : cette distance est la cote du point, si le plan de comparaison, qui est toujours horizontal, se trouve au-dessus de la figure ; on l'appelle altitude, lorsque le plan de comparaison est le niveau moyen de la mer et qu'il s'agit du relief d'un pays. Le plan est toujours accompagné d'une échelle, ce qui permettrait, si on le voulait, de remplacer le plan coté par deux projections orthogonales. Avec un peu d'habitude, on arrive vite à juger parfaitement le relief d'un terrain représenté sur un plan coté; grâce à l'échelle, il est facile de trouver la pente d'une ligne quelconque. Ce mode de représentation est souvent fort utile.

Surfaces topographiques. En géométrie, on n'étudie que des surfaces régulières et de génération connue, surfaces que l'on ne rencontre jamais dans la nature : ainsi la surface du sol ne se définit pas géométriquement; on appelle surfaces topographiques ces surfaces non définies et qui sont telles qu'une verticale les rencontre en un seul point.

On les représente au moyen de courbes de niveau, ou sections faites dans la surface par des plans horizontaux équidistants : il y a généralement deux échelles, l'une pour les hauteurs, dix fois plus grande que l'autre qui est destinée aux longueurs horizontales. La distance verticale entre deux courbes de niveau consécutives étant constante, la pente du terrain entre ces deux courbes sera en raison inverse de la distance horizontale qui les sépare. On peut donc à simple vue saisir le relief du terrain par l'inspection du plan topographique.

Lorsqu'il s'agit de trouver des courbes de niveau intercalaires, on admet que la pente est constante entre deux courbes de niveau, c'est-à-dire que le terrain est assimilé à une série d'éléments plans, et l'on mène une normale commune aux deux courbes de niveau, normale que l'on partage en autant de parties égales que l'on veut inscrire de courbes intercalaires.

Il est facile, avec l'échelle du dessin, de tracer sur une surface topographique une ligne droite de pente donnée.

On a fait dans ces derniers temps une application heureuse des surfaces topographiques, en les substituant aux tables à double entrée.

Une surface est la représentation d'une équation à trois variables $f(x.\,y,z)=0$, et si la surface est topographique, il n'y a pour Z qu'une seule valeur correspondant à un point du plan horizontal : la surface peut alors se mettre sous la forme $Z=f(x.\,y)$.

Si l'on donne à Z diverses valeurs 1. 2. 3. 4....., il en résultera autant de courbes de niveau, dont l'équation générale est $f(x.\,y)=A$; on trace ces courbes sur une feuille de papier, ainsi que deux axes rectangulaires des x et des y; le long de chaque courbe on marque la valeur de Z ou A correspondante. Maintenant, supposons qu'on donne x et y et qu'on demande la valeur de Z, on cherche x et y sur les deux axes gradués, on suit les coordonnées correspondantes; ces coordonnées se coupent en un point qui tombe entre deux courbes de niveau auxquelles correspondent les valeurs A et A + 1 de Z, on peut donc trouver d'une manière approximative la valeur de Z qui répond aux valeurs données pour x et y.

C'est sur ce principe que s'appuient les divers tableaux servant aux calculs des déblais et des remblais, que nous aurons lieu plus tard d'étudier en détail.

DE LA STÉRÉOTOMIE.

Son objet. Pour qu'un solide soit défini, il faut que l'on connaisse la génération et la position respective des diverses surfaces qui le limitent.

Les arêtes du corps sont les intersections de ses faces. On représente un corps par ses projections sur deux plans rectangulaires, et cette représentation s'opère grâce aux principes démontrés en géométrie descriptive : cela s'appelle faire l'épure du corps considéré.

Comme, généralement, les plans de projection sont arbitraires, il faut autant que possible les choisir parallèles aux faces principales du solide, afin que leurs dimensions se projettent en vraie grandeur.

Au moyen de l'épure on passe à l'exécution du solide qu'il faut extraire d'un bloc donné, et ce passage s'opère par des constructions geométriques et avec des méthodes rigoureuses. La science qui les expose s'appelle stéréotomie (coupe des solides).

Principes. Quand il s'agit d'exécuter un solide en pierre ou en bois, il est rare que la matière offerte par la nature permette de le faire avec un seul morceau; il faut donc diviser le solide en plusieurs parties, et le mode de division varie pour chaque cas particulier. On s'efforce toujours de satisfaire aux conditions suivantes : 1° Les arêtes doivent être des lignes simples, des droites, des cercles, ou d'autres courbes usuelles faciles à tracer; 2° Les faces de contact ou joints doivent être aussi des surfaces simples telles que des surfaces réglées, des surfaces de révolution; 3° Les angles des faces entre elles doivent peu s'écarter de l'angle droit. Les deux premières conditions ont une raison que chacun conçoit: la troisième condition est imposée par ce fait que, deux solides étant accolés et présentant à leur arête de contact des angles dièdres inégaux, offriront une inégale solidité, l'un des angles sera obtus et l'autre aigu, et l'angle aigu pourra se rompre au moindre choc; pour éviter cet inconvénient, il faut donc que les deux angles dièdres soient égaux, c'est-à-dire que tous deux soient droits.

La stéréotomie comprend deux grandes sections : la coupe des pierres et la charpente.

COUPE DES PIERRES

PRINCIPALES FORMES DES MURS ET DES VOUTES.

Les pierres de taille sont toutes celles qui sont taillées suivant un appareil géométrique; les pierres qui ne sont point taillées d'après des épures exactes rentrent dans la catégorie des moellons.

Murs. Dans un mur, les pierres sont disposées par assises ou rangées horizontales, séparées par des faces horizontales qu'on appelle lits. Les surfaces qui séparent les pierres dans le sens vertical sont des joints. Les lits sont les surfaces par lesquelles la pression se transmet d'une assise à l'autre, il est donc important qu'ils soient parfaitement taillés; on peut avoir pour les joints un peu plus de tolérance.

Une pierre a deux lits : le lit de pose qui est en dessous et le lit de dessus : on étend le mortier sur le lit de dessus de la pierre inférieure, puis on vient poser sur le mortier la pierre de l'assise supérieure par son lit de pose : on la comprime avec un marteau ou maillet de façon à faire refluer le mortier de toutes parts. Le lit de pose doit être plus particulièrement soigné, car les creux ou flèches qu'il présente pourraient n'être point complétement remplis par le mortier ; cet inconvénient n'existe pas pour le lit de dessus.

On prend bien garde que les joints de deux assises adjacentes ne soient pas dans le prolongement l'un de l'autre; il faut au contraire un enchevêtrement des pierres qui les rende solidaires, et les joints doivent toujours se découper.

La distance qui sépare un joint des joints voisins appartenant aux assises adjacentes s'appelle découpe.

Pour augmenter encore l'enchevêtrement, on a soin de juxtaposer des pierres dont l'une a sa plus grande dimension sur la surface ou parement du mur, et l'autre au contraire a sa plus grande dimension perpendiculaire à la surface; la première est un carreau, la seconde une boutisse ou pierre à longue queue.

Lorsqu'une boutisse occupe toute la largeur du mur, elle devient un parpaing; il est bon de disposer des parpaings de place en place.

Les murs sont généralement à parements verticaux : quelquefois les murs sont à parement incliné, on dit alors qu'ils possèdent un fruit; le fruit se mesure par la tangente de l'angle que fait avec la verticale la ligne de plus grande pente du parement.

Les notions relatives à la pratique de la maçonnerie seront exposées en architecture.

Voûtes. Les grandes difficultés de la coupe des pierres se rencontrent dans

la construction des voûtes. Dans une voûte on distingue diverses parties dont voici la définition ; on appelle :

Pieds-droits, les murs qui s'élèvent jusqu'à la naissance de la voûte et la soutiennent ;
Imposte, la dernière assise des pieds-droits ; dans la pratique on donne ce nom à la moulure qui généralement indique la dernière assise ;
Naissance, la ligne de séparation des pieds-droits et de la voûte ;
Intrados, la surface vue de la voûte ;
Extrados, la surface cachée (l'extrados n'est généralement que dégrossi et recouvert d'un enduit, tandis que l'intrados est taillé avec le plus grand soin) ;
Reins, les parties latérales de la voûte ;
Voussoirs, chaque pierre de la voûte ;
Douelle, la face courbe de chaque voussoir qui se trouve sur l'intrados ;
Clef, le voussoir du milieu (il y a toujours un nombre impair de voussoirs, et la clef est le voussoir qui ferme la voûte, c'est celui que l'on place le dernier en le faisant entrer par une forte pression).

Les voûtes les plus usitées sont les voûtes en berceau : ce sont celles dont l'intrados est cylindrique ; on détermine un berceau par l'ouverture, distance qui sépare les pieds-droits, et la montée, distance de la génératrice supérieure au plan des naissances. Si la montée est supérieure à la moitié de l'ouverture, la voûte est surhaussée ; si la montée est égale à la moitié de l'ouverture, la voûte est dite en plein cintre, et si la montée est inférieure à la moitié de l'ouverture, la voûte est surbaissée.

La seule voûte surhaussée que l'on emploie est l'ogive, formée de deux arcs de cercle qui se coupent, qui sont symétriques et tangents au parement des pieds-droits. On emploie plus communément soit le plein cintre circulaire, soit la voûte surbaissée. On donne pour directrice de l'intrados à une voûte surbaissée soit un arc de cercle, soit une ellipse, soit une anse de panier ; l'arc de cercle est une courbe peu gracieuse, à cause de la brisure qui en résulte aux naissances, mais pour les ponts en rivière elle permet de donner aux eaux un écoulement facile ; l'ellipse a l'inconvénient de s'abaisser trop rapidement aux naissances, le rayon de courbure y est trop petit, et on lui préfère quelquefois l'anse de panier, formée d'arcs de cercle.

Suivant la grandeur et la forme des voûtes, les appareilleurs les rangent dans l'une des cinq classes suivantes : portes, voûtes, descentes, trompes, escaliers. Nous verrons des exemples de chacune.

TAILLE DE LA PIERRE. TRACÉ ET VÉRIFICATION DES ÉPURES D'EXÉCUTION.

Tracé des épures. « Les épures se tracent sur parquet horizontal ou sur aire verticale en plâtre. Ce dernier mode est presque seul usité à Paris et dans les environs, où l'espace fait défaut.

Le parquet se compose de planches reliées et dressées avec soin ; dans la construction de ces parquets, on évite le sapin dont les fibres se déchirent trop lorsque l'on trace les lignes à la pointe d'acier. On préfère de minces planches de chêne ; sur ces parquets les épures se tracent en grandeur d'exécution, abso-

lument de même que les épures réduites se tracent sur le papier; on emploie pour tracer des lignes droites des règles lorsque la ligne est courte, et le cordeau lorsqu'elle est trop longue pour pouvoir être tracée de cette première manière. Pour les cercles on se sert du compas ordinaire ou du compas à verge si les dimensions sont plus grandes; on est quelquefois obligé de tracer les cercles très-grands par points et on a pour cela plusieurs méthodes basées, soit sur la propriété du segment capable d'un angle donné, soit sur le calcul des ordonnées.

Dans ces épures, les constructions se font à la craie, à la sanguine ou au charbon, et les lignes qui doivent subsister et être utiles dans la taille des pierres se tracent à la pointe d'acier qu'on appelle traceret. L'épure terminée, on balaye le parquet et il ne reste plus que les lignes tracées au traceret; l'épure ainsi simplifiée doit subsister jusqu'à l'achèvement total de la construction. Ensuite, on rabote légèrement le parquet pour pouvoir y construire une nouvelle épure.

L'épure terminée, on procède à la construction des panneaux. Le menuisier est chargé de ce travail. Il construit ces panneaux avec des règles minces assemblées à mi-bois et retenues par des pointes. Les panneaux étant achevés, on les cloue sur l'épure même. L'appareilleur qui est chargé de l'épure a représenté les lits par une ligne aussi fine que possible, mais il a eu soin de prévenir le menuisier de l'épaisseur que l'on voulait donner au mortier interposé entre les lits; cette épaisseur n'est jamais inférieure à 3 ou 4 millimètres. Le menuisier ménage donc cette épaisseur. Les panneaux étant cloués sur l'épure, l'appareilleur les vérifie et examine surtout si on a laissé les dimensions nécessaires aux lits. Pour cela, il est muni souvent d'une tige qui a même épaisseur que les lits et qui doit pouvoir glisser entre les panneaux et ne pas avoir de jeu. On marque les panneaux et on les enlève pour les porter au chantier. On met en général une couche de peinture à l'huile sur la partie du panneau qui correspond au parement, afin que l'ouvrier la soigne d'une manière particulière.

Quand une construction dure longtemps, il importe de faire rentrer de temps en temps les panneaux à la salle d'épures, afin de les vérifier de nouveau.

A Paris, où l'espace est trop précieux pour en employer un si grand à des salles d'épures, on profite du bas prix du plâtre et de son excellente qualité pour construire des aires verticales sur un pan de mur quelconque soigneusement dressé. Dans les épures ainsi construites, le niveau et le fil à plomb jouent un rôle important.

Outre les panneaux on construit encore des contre-panneaux surtout dans le cas où la pierre est décorée de moulures. Ces contre-panneaux sont des planchettes en bois ou en métal; ils s'appliquent perpendiculairement à la pierre et portent en creux l'empreinte des saillies qu'on doit laisser subsister sur la pierre.

On appelait autrefois cherche et on appelle aujourd'hui cerce le contre-panneau qui porte le profil d'une courbe.

On appelle biveau l'ensemble de deux règles formant un angle déterminé. Cet instrument sert à passer d'une face d'un angle dièdre à l'autre. Le biveau est dit biveau-cerce si l'une de ses branches est courbe et sert à passer d'un plan à une surface courbe ou inversement.

L'équerre est un biveau dont les branches sont rectangulaires. La fausse équerre qui en charpente prend le nom de sauterelle se compose d'une branche de niveau assemblée à enfourchement entre deux règles qui forment une seconde branche; elle sert à transporter un angle d'une pierre sur l'autre.

On nomme jauge une règle entaillée exactement à la mesure que doit donner

l'ouvrier à une longueur. On l'emploie au lieu d'indiquer à l'ouvrier la dimension en mètres et fractions de mètres, afin d'éviter les erreurs souvent notables qui résulteraient des différences que l'on rencontre entre les divers mètres. » (Mannheim, *Cours de stéréotomie à l'École polytechnique.*)

Taille de la pierre. On distingue pour la taille deux méthodes différentes : 1° la taille par équarrissement; 2° la taille directe.

Avant d'appliquer ces méthodes, il faut savoir exécuter une face plane sur une pierre donnée. Dans les carrières les pierres sont disposées généralement par assises horizontales ou bancs; les surfaces qui séparent les bancs sont des lits de carrière : c'est dans la direction normale au lit de carrière qu'une pierre peut supporter les plus grands efforts. Dans les murs il faut donc veiller à ce que le lit de carrière soit horizontal, et dans une voûte il faut que le lit de carrière s'écarte peu du plan normal à la résultante des pressions.

Le tailleur de pierres commence par dresser le lit de carrière : l'outil dont il se sert est une sorte de marteau à deux tranchants, l'un petit, l'autre grand. Avec le petit tranchant il exécute sur deux bords contigus de la pierre une bande plane de largeur à peu près égale à celle du tranchant; sur ces bandes il trace deux lignes droites qui vont lui servir de génératrices pour le plan cherché : il enlève avec le large tranchant de son marteau des éclats de pierres de façon que la surface restante soit limitée à une règle qui s'appuie sans cesse sur les deux droites dont nous venons de parler.

Ceci posé, pour la méthode par équarrissement, on cherche à trouver sur l'épure un parallélipipède dont les contours comprennent ceux de la pierre, ou, pour parler géométriquement, un parallélipipède capable de la pierre donnée; presque toujours on choisit un parallélipipède rectangle, comme nous le verrons dans les exemples subséquents. Aux douelles courbes on substitue d'abord un plan qui contienne les arêtes de la douelle, puis on vient plus tard creuser ce plan et faire apparaître la surface courbe, soit au moyen d'une cerce, soit avec une règle et les directrices de tête si la douelle est une surface réglée. Sur l'épure on prolonge les diverses faces qui limitent la pierre dans un sens jusqu'à la rencontre de deux faces opposées du parallélipipède : on a de la sorte sur ces deux faces opposées un contour qui comprend les directrices des divers plans limitant le solide cherché; il est facile alors avec une règle s'appuyant sur les directrices correspondantes de faire disparaître toute la partie inutile du bloc de pierre. On a donc fait apparaître les arêtes de la pierre dirigées dans un certain sens : sur ces arêtes on porte des longueurs que l'on trouve sur l'épure et qui donnent les limites des autres faces du solide que l'on fait apparaître à leur tour.

Taille directe, par biveaux et panneaux. Si le polyèdre capable de la pierre cherchée n'est plus un parallélipipède, l'appareil se fait par la méthode des angles dièdres ou biveaux avec le secours de panneaux : on prend le bloc de pierre tel que la carrière le présente et on y fait apparaître une des surfaces de la pierre à établir, généralement une face plane. L'épure donne le panneau de cette face que l'on peut limiter sur la pierre; elle donne aussi les angles de cette face avec les faces voisines, et au moyen de biveaux ou de biveaux-cerces on fait apparaître ces faces que de nouveaux panneaux servent à limiter. On opère ainsi de proche en proche.

La transformation d'un polyèdre à faces planes en un solide à faces courbes se fait ou par les panneaux, lorsque les faces sont développables, ou par le piqué,

qui consiste à rapporter par points sur une surface donnée une courbe de cette surface dont on a les projections sur l'épure.

L'art difficile de l'appareilleur consiste à choisir dans chaque cas la méthode qui satisfait le mieux aux conditions de la stabilité, ainsi qu'à l'économie de la main-d'œuvre et de la matière.

Les solides de révolution s'exécutent mécaniquement au tour : c'est ainsi que se font les colonnes en pierre, les balustres, etc.... Le tourneur a pour se diriger une plaque de tôle découpée suivant la méridienne de la surface.

A Paris, les pierres arrivent pour ainsi dire équarries, car on veut transporter le moins possible de matière inutile, et l'on opère la taille par équarrissement. Mais le dégrossissement qu'on a fait subir à la pierre double pour ainsi dire la besogne, et, lorsqu'on taille les pierres en carrière, il faut employer la taille directe. Un maître appareilleur exercé juge à la seule inspection d'un bloc s'il pourra en tirer un solide demandé; la taille par équarrissement est toujours plus exacte que la taille directe, toutefois cette dernière donne de bons résultats pourvu qu'on ait affaire à des ouvriers soigneux et attentifs.

Il sera plus commode et plus simple d'exposer dans le cours de ponts l'appareil des murs en aile, des avant-becs et couronnements des piles de ponts que, d'après le programme, nous devrions étudier ici.

APPAREIL DES BERCEAUX DROITS, EN TALUS, LÉGÈREMENT BIAIS; DES BERCEAUX EN DESCENTE.

Les portes sont de petites voûtes construites dans un mur, soit pour former un passage, soit pour éclairer un monument. Les voûtes et les portes qui se pénètrent ou se rachètent ont leurs naissances dans le même plan horizontal.

Porte droite en plein cintre. C'est la porte la plus simple, elle a pour intrados un berceau circulaire droit à génératrices horizontales; la partie supérieure de la planche 7 en donne la projection verticale. Pour l'appareiller on divise le demi-cercle de tête en un nombre impair de parties égales, cinq par exemple, et l'un des voussoirs est limité à la douelle *amb*; les deux plans de joints passent par l'axe du cylindre et par les génératrices projetées en (*a*) et (*b*); pour raccorder le voussoir avec la maçonnerie voisine, on retourne le joint (*ae*) suivant l'horizontale *ed* et le joint (*bc*) suivant la verticale *cd*. Le voussoir se compose donc d'un prisme droit, dont la section droite a cinq côtés, l'un de ces côtés étant un arc de cercle. Le parallélipipède rectangle capable de ce prisme est évidemment celui qui a pour section droite *fgdh*.

Ayant un bloc équarri suivant *fgdh*, on rapportera sur une base les points *abcde* et l'on tracera avec une cerce l'arc *amb* : sur la face opposée du parallèlipipède on en fait autant, et avec une règle s'appuyant sur les directrices correspondantes on enlève du bloc toutes les parties inutiles.

Porte biaise en talus rachetant un berceau cylindrique. Un mur est en talus lorsqu'il est limité d'un côté par un plan vertical, de l'autre par un plan incliné, dont les horizontales sont parallèles au parement vertical de l'autre face; mais si les horizontales de la face inclinée ne sont pas parallèles à la face verticale, le mur est dit biais en talus.

La porte qui nous occupe (planche 7) est formée d'un berceau droit, dont (*r'*, *a*, *b*, *s'*) est le demi-cercle de section droite; ce berceau est limité d'un côté à un plan incliné dont *ks* est la trace horizontale; la section faite dans ce plan

incliné par le plan vertical *kl*, se projette en *k'l'* quand le plan *kl* a été amené en kl_1 parallèlement au plan vertical de projection. Le plan de tête coupe l'intrados suivant une ellipse projetée verticalement sur la section droite du cylindre, et horizontalement suivant l'ellipse (*r a'b's*) que l'on peut construire par points suivant les procédés usités en géométrie descriptive (plans auxiliaires horizontaux). Les joints normaux des voussoirs ayant tous la même largeur, les points tels que (*c*, *e*) se trouvent sur un cylindre parallèle au cylindre d'intrados et se projettent horizontalement sur une ellipse semblable à la première. D'autre part, le berceau vient pénétrer un autre berceau droit ayant même plan de naissance; si l'on coupe ce cylindre par le plan vertical (*tu*) et qu'on amène ensuite ce plan en tu_1, parallèlement au plan vertical, la section droite se projette suivant une demi-circonférence dont *t'u'* est un arc.

Le voussoir se composera d'un prisme droit, tronqué d'un côté par un plan et de l'autre par un cylindre. On prend comme section droite de ce voussoir la section (*abcde*) que nous avons déjà adoptée pour la porte droite, section qui représente la projection verticale du voussoir; reste à construire la projection horizontale. Les arêtes du voussoir étant normales au plan vertical se projettent horizontalement suivant des perpendiculaires à la ligne de terre. La projection horizontale du point (*e*), par exemple, est en outre sur l'intersection du plan horizontal (*ed*) avec le talus du mur; le plan (*ed*) coupe la ligne *k'l'* du talus en un point $l'l_1$, qui, ramené à sa vraie position, vient en *l*, de sorte que l'intersection du talus et du plan horizontal (*ed*) se projette suivant la droite *le'd'* parallèle à la trace horizontale (*rs*) du talus. Les points *e'* et *d'* sont donc déterminés, on déterminera de même *a'*, *b'*, *c'*.

Reste à trouver l'intersection du voussoir avec la voûte. La construction est analogue; supposons qu'on veuille trouver le point où l'arête projetée en *d* rencontre la grande voûte, nous remarquerons que le plan horizontal passant en *d* coupe cette voûte suivant une génératrice dont *u'*, u_1 est un point rabattu; cette génératrice vient donc se projeter en *u*C, et le point C est le point où l'arête projetée en *d* rencontre la voûte. On construit de la même manière les autres points de rencontre des arêtes et de la voûte; c'est encore par ce moyen que l'on cherche la courbe d'intersection du berceau de la porte avec le berceau de la voûte, des joints *ae*, *bc* avec ce même berceau de la voûte; quant au plan de joint (*de*), il coupe la voûte suivant un arc de sa section droite.

Voilà l'épure faite : proposons-nous de construire un voussoir. Nous prendrons, par exemple, un bloc de pierre ayant pour base le rectangle ABCD et pour section droite le rectangle (*fhdg*). Sur chaque extrémité du bloc, nous appliquons le panneau (*ambcde*) qui est un pentagone mixtiligne, et nous extrayons du bloc un prisme droit ayant pour section droite ce pentagone : maintenant pour faire apparaître la tête plane (*a'm'b'c'd'e'*), nous prenons sur les arêtes AB, DC... du prisme des longueurs égales à Aa', Dc', Dd'... et les points *a'*, *c'*, *d'*... ainsi obtenus sont joints par des lignes droites tracées sur les faces du prisme; avec ces deux droites, en se servant d'une règle qui s'appuie constamment sur elles, on fait apparaître le plan de tête cherchée. D'un autre côté, si on fait tourner le plan de joint (*ae*, *a'e'*) de manière à venir l'appliquer sur le plan horizontal, on aura ce joint en vraie grandeur, la courbe qui termine ce joint à l'endroit où il rencontre la voûte se construit par points comme l'indique la géométrie descriptive, puisqu'on a sa projection verticale (*ae*) et sa projection horizontale *vx;* les arêtes (*a'v*, *e'x*) se projettent en vraie grandeur, on a donc tout ce qu'il faut pour déterminer le panneau (*a'e' vx*). On construira de même les panneaux projetés

en (*bc*) et en (*cd*) : quant au panneau (*e'd'x*C), il est projeté horizontalement en vraie grandeur; on aura donc tout ce qu'il faut pour déterminer le contour de la pénétration. Le cylindre de la grande voûte se tracera au moyen d'une droite que l'on fera mouvoir parallèlement à l'horizontale *x*C, en l'appuyant toujours sur le contour de la pénétration.

Nous engageons le lecteur à exécuter lui-même l'épure précédente en adoptant des données précises; il fera bien d'exécuter le développement des panneaux; après un pareil travail, il connaîtra parfaitement l'appareil d'une porte biaise en talus.

Au lieu d'une pénétration de voûte, on pourrait avoir une pénétration dans un second plan incliné : les deux têtes seraient donc terminées par des talus inclinés à horizontales non parallèles. C'est un exemple un peu plus simple que le précédent, qu'il est bon de traiter.

Autre exemple de porte : Imaginez un mur limité à deux cylindres verticaux au lieu d'être limité à deux plans verticaux; si ce mur est traversé par une porte, on a ce qu'on appelle une porte en tour ronde. Si l'axe du berceau rencontre l'axe commun des cylindres limitant le mur, on a une porte droite en tour ronde, presque aussi facile à traiter que la porte droite simple; si l'axe du berceau ne rencontre pas l'axe commun des cylindres, on a une porte biaise en tour ronde; dans ce cas, les panneaux de tête des voussoirs sont un peu plus compliqués. Enfin, si l'un des cylindres est remplacé par un cône, on a une porte en tour ronde en talus, qui peut être droite ou biaise. Ces différentes épures sont presque la reproduction de celle que nous venons de traiter en détail, et, si le lecteur possède bien cette dernière, il lui sera facile d'exécuter les autres que nous ne pourrions reproduire sans dépasser le cadre de notre travail.

Biais passé ou corne de vache. Lorsqu'il s'agit d'ouvrir dans un mur droit une porte d'un faible biais, on emploie le biais passé ou corne de vache.

Soit un mur dont les parements verticaux se projettent suivant les droites (*mn*) (*pq*); l'un de ces plans (*pq*) est choisi comme plan vertical de projection (planche 8); on veut ouvrir dans ce mur une porte oblique dont les pieds-droits verticaux se projettent suivant (*mp*) et (*nq*), et dont les courbes de tête soient les cercles égaux décrits sur (*mn*) et (*pq*) comme diamètres. Pour la solidité de cette voûte on veut que les plans de joint des voussoirs soient normaux aux parements du mur, et on les fait passer par la droite (*gf*) menée par le centre du parallélogramme (*mnpq*) qu'il faut recouvrir. De la sorte, un voussoir en projection verticale aura pour contour le pentagone (*abcde*). On pourrait former la voûte d'un berceau cylindrique dont les génératrices seraient parallèles aux droites (*mp*) et (*nq*), et dont les directrices seraient les circonférences décrites sur (*mn*) et (*pq*) comme diamètres : mais alors l'intersection de la douelle d'un voussoir avec les joints adjacents tels que (*ae*) serait une ellipse. C'est ce que représente la figure (1).

Supposons un moment qu'on admette cette solution et cherchons à construire le voussoir. Il faut d'abord avoir les panneaux de joint : l'un de ces panneaux se projette verticalement sur (*ae*) et horizontalement sur le quadrilatère ($a'\alpha'e'e''$) pour lequel le côté ($a'\alpha'$) est une ellipse; cette ellipse se détermine par points en prenant pour plans auxiliaires des plans parallèles au plan vertical de projection, lesquels coupent le berceau suivant des cercles de diamètre *mn* ayant leur centre sur la droite (o_1o') et le joint suivant une droite projetée en vraie grandeur suivant (*ge*); comme le cercle se projette aussi en vraie grandeur sur

le plan vertical, on a facilement un point de l'intersection et on peut construire la courbe ($a'\,\alpha'$). Cherchons le panneau en vraie grandeur; pour cela, rabattons le plan (*fge*) sur le plan horizontal : le point a vient en a_1, α en α_1 et l'ellipse rabattue est $a_1\,\alpha_1$ que l'on construit en cherchant le rabattement de plusieurs de ses points sur le plan horizontal; l'arête (*e*) normale au plan vertical vient en ($\varepsilon\varepsilon$) et le panneau en vraie grandeur est ($a_1\,\alpha_1\,\varepsilon\varepsilon$).

Pour tailler le voussoir, on fera d'abord sortir d'un parallélipipède rectangle un prisme droit ayant (*abcde*) pour base, et l'épaisseur du mur (*gf*) pour hauteur. Ceci fait, sur les deux bases du prisme on appliquera les panneaux (*abcde*) et ($\alpha\beta$ *cde*), puis sur les faces latérales les panneaux (*ea*α), (*c*β*b*) que nous avons appris plus haut à construire. Il n'y a plus qu'à faire apparaître la surface cylindrique de la douelle. Pour cela, on mènera sur l'épure une série de génératrices du cylindre, dont on cherche les points d'intersection soit avec les arcs (*ab*, $\alpha\beta$), soit avec les ellipses projetées en (*a*α) et (*b*β); on a soin de rapporter les points ainsi obtenus sur les panneaux, et en faisant mouvoir une règle qui passe toujours par deux points appartenant à une même génératrice, on fait apparaître la douelle.

Mais généralement on ne recouvre point le parallélogramme (*mnpq*) avec un cylindre; on se propose d'avoir pour intersection du plan de joint (*ge*) avec la douelle une ligne droite, on adopte donc comme surface d'intrados la surface gauche engendrée par une droite mobile qui s'appuie à la fois sur les deux circonférences dont (*mn*) et (*pq*) sont les diamètres et sur la droite (*fg*) prolongée; les arêtes de voussoirs se trouvent donc être précisément des génératrices de cette surface, qu'on appelle corne de vache. Un voussoir du biais passé gauche se construit absolument comme celui du biais passé cylindrique (fig. 2, pl. 8); un plan de joint se projette sur le quadrilatère rectiligne ($a'\alpha'e'e''$) et se rabat en vraie grandeur suivant le quadrilatère ($a_1\,\alpha_1\,\varepsilon\varepsilon$). Pour faire apparaître la douelle, on se sert d'une règle mobile qui, à chaque instant, passe par deux points appartenant l'un à l'arc de tête (*ab*), l'autre à l'arc $\alpha\beta$.

On voit que la taille de la douelle est bien facilitée par ce fait que les points correspondants d'une génératrice de l'intrados sont uniquement situés sur les arcs de tête.

Nous engageons le lecteur à exécuter une épure spéciale du biais passé gauche : une des génératrices se projette verticalement sur (*ge*), elle rencontre les cercles directeurs en (*a*) et (α) et par suite se projette horizontalement suivant la droite ($a'\alpha'$); on construit une série de génératrices. Ceci fait, on cherche l'intersection de la surface par un plan parallèle aux plans de tête et par le plan vertical (o_1o') qui joint la ligne des centres. On reconnaît que l'intersection par ce plan vertical est une ligne bombée vers le milieu, ce qui donne à l'intrados un aspect fort désagréable. Les sections par des plans parallèles au plan vertical ne sont pas des cercles, de sorte que l'œil est choqué par une variation continue dans la courbure.

Pour faire la division en voussoirs, on décrit un cercle du point *g* comme centre enveloppant les deux cercles de tête, et on divise ce cercle en un nombre impair de parties égales. Il en résulte, et la figure le montre bien, des longueurs fort inégales pour les voussoirs d'une même tête, ce qui produit un fort mauvais effet; on peut remédier à cet inconvénient en noyant dans la maçonnerie de remplissage une partie des grands voussoirs; mais il est toujours mauvais d'employer un trompe l'œil en architecture.

Autre inconvénient : les lits de joint sont obliques sur l'intrados, de sorte que

deux voussoirs voisins se touchent par des angles inégaux, et il faut nécessairement qu'au bout d'un certain temps le plus petit de ces angles s'écrase sous la pression de l'autre, si la différence est notable, comme cela arrive près du sommet.

On voit donc que les auteurs anciens, pour lesquels le biais passé était l'arche biaise parfaite, étaient loin de la vérité.

Arrière voussure de Marseille. Un second exemple de voûte à intrados gauche est la porte qu'on appelle arrière voussure de Marseille (planche 9). Cette porte est percée dans un mur droit dont XX', YY' sont les parements : son intrados se compose : 1° d'un cylindre circulaire droit projeté horizontalement sur le rectangle (*ab a'b'*) et verticalement sur la circonférence de diamètre φφ'; 2° d'une partie plane et verticale projetée horizontalement sur la droite (*cbb'c'*) et verticalement sur la surface annulaire comprise entre les circonférences de diamètre φφ' et δδ'; 3° d'un cylindre circulaire droit projeté horizontalement sur le rectangle (*cd c'd'*) et verticalement sur la circonférence de diamètre (δδ'); 4° d'une surface gauche engendrée par une ligne droite qui s'appuie sur la droite indéfinie (ωβ) située dans le plan des naissances, sur la circonférence (*dd'*, δδ') et sur l'arc de cercle (*hlk*) de grand rayon, arc situé dans le plan de tête YY'; 5° de plans verticaux projetés horizontalement sur (*ed, e'd'*). Le trapèze *ed e'd'* est donc recouvert par une surface gauche. Le cylindre (*ab a'b'*) est le tableau de la porte, le cylindre *cd c'd'* est la feuillure où se logent les ventaux et leurs gonds, enfin la surface gauche constitue l'arrière voussure proprement dite; la forme évasée est destinée à faciliter l'accès des voitures et à protéger les ventaux contre les chocs des roues.

Cette disposition se remarque aussi dans les fenêtres monumentales. Considérons d'abord une assise du pied-droit : la pierre sera facile à tailler en prenant un panneau de profil (*a'b'c'd'e'Y'*) que l'on appliquera sur la face horizontale de la pierre, et on fera apparaître les autres faces avec l'équerre.

On appelle faces d'ébrasement les plans verticaux projetés sur (*de, d'e'*). Les verticales (*e, sh*) (*e', s'k*) limitent l'arc de cercle directeur *hlk*; les génératrices de l'intrados correspondantes se projettent suivant (*a'sh, rs'e*) (*a'qk, rq'e'*) et elles limitent la surface gauche : pour recouvrir les surfaces projetées sur les triangles (*hsδ'*), (*kqδ*), nous nous servirons de deux autres surfaces gauches un peu différentes de la première, et engendrées par une droite qui s'appuie sur l'axe (α', αβ), sur le cercle de feuillure (*dd'*, δδ') et sur un arc de cercle placé dans le plan des faces d'ébrasement; si l'on fait tourner une face d'ébrasement autour de la verticale (*d'*) de manière à l'amener parallèlement au plan vertical, cet arc directeur se projettera sur l'arc δ*k'*. Il doit satisfaire à une seule condition : permettre à la partie arrondie du ventail, laquelle est un quart de cercle ayant pour rayon (α'δ'), de venir s'appliquer contre la face d'ébrasement, afin que la porte puisse s'ouvrir complétement. Il faut donc que le rayon de l'arc (δ*k'*) soit un peu supérieur au rayon de la feuillure.

On voit que l'arc δ*k'* est forcément déterminé; on s'en sert pour construire l'arc de tête (*hlk*), ainsi que nous allons l'expliquer : Lorsque deux surfaces ont une génératrice commune, généralement elles se coupent, et si l'on veut prolonger l'une par l'autre on obtient une cassure produisant à l'œil un effet désagréable. C'est ce qui arriverait ici, si nous choisissions au hasard l'arc (*hlk*) directeur de la seconde surface gauche qui a avec la première la génératrice commune (*α'qk, rq'e'*). On veut au contraire que les deux surfaces se raccordent tangentiellement, c'est-à-dire qu'elles soient tangentes tout le long de la génératrice

commune; or, on démontre que, pour que les deux surfaces soient tangentes tout le long d'une génératrice, il faut et il suffit qu'elles soient tangentes, c'est-à-dire qu'elles aient même plan tangent en trois points de cette génératrice. Dans le cas actuel, les plans tangents sont les mêmes : 1° au point (γ, α'), car ils contiennent chacun la génératrice $(\alpha' qk, rq' e')$ et la directrice $(\alpha', \alpha\beta)$ de la surface; 2° au point (qq'), car ils contiennent chacun la génératrice et la tangente en qq' au cercle de feuillure directeur. Reste à établir la coïncidence des plans tangents au point $(e'k)$. La tangente en k' à l'arc d'ébrasement est $k'm$ qui rencontre la verticale (d') de la feuillure en (m); mais la génératrice rencontre le plan dd' au point q,q', donc le plan tangent en (e', k) à la surface gauche latérale coupe le plan vertical (dd') suivant la droite qm, et par suite le plan YY' suivant km' parallèle à (qm). Si au point k j'élève la droite $k\omega$ perpendiculaire à la ligne km', cette droite située dans le plan de tête YY', rencontre la verticale $\alpha' l$ de ce même plan de tête en un point ω qui sera le centre de l'arc hkl, ωk sera le rayon; on voit en effet que les plans tangents aux deux surfaces comprennent, outre la génératrice, la droite km', donc ces deux plans se confondent, et les surfaces se raccordent.

On prend pour plans de joint des voussoirs des plans passant par l'horizontale $(\alpha', \alpha\beta)$: il en résulte que les arêtes de douelle sont des droites, et qu'il est facile de construire le panneau projeté par exemple sur $(\alpha' qk)$; en le rabattant sur le plan horizontal on l'aura en vraie grandeur, la figure le représente en (BCD xx GFE); si le joint coupe à la fois la surface gauche latérale de la voussure et la face verticale d'ébrasement, le profil du panneau, qui se construit comme plus haut, devient celui que représente la figure en (BCD yzGFE).

Taille du voussoir : Les voussoirs se limitent sur les plans de tête comme pour des voûtes ordinaires. D'un bloc de pierre, formant un parallélipipède droit, on pourra extraire un prisme droit sur les bases duquel on indiquera les panneaux de tête et sur deux des faces les panneaux de joint. On comprend sans peine comment on pourra alors faire apparaître les différentes surfaces de la douelle. La taille ne présente pas de difficultés.

Remarque : En réalité, dans l'arrière voussure, le plan de joint que nous avons choisi n'est pas normal partout à la surface gauche de douelle, car les normales à une surface gauche le long d'une même génératrice forment un hyperboloïde du second degré, surface que nous avons étudiée en géométrie analytique. Les dimensions de la porte rendent ce défaut peu sensible, et on ne s'en inquiète pas en présence de l'avantage que l'on trouve à avoir un joint plan.

DESCENTES : On appelle descentes de petites voûtes cylindriques recouvrant des passages inclinés, par exemple : des cages d'escalier, des soupiraux. Le plan des naissances a la même inclinaison que le terrain ou passage qu'il faut recouvrir. Cette inclinaison est la seule différence qu'il y ait entre les portes et les descentes. On conçoit bien que l'appareil et la taille seront analogues. La forme des parements qui limitent le mur dans lequel on pratique une descente influe sur l'appareil, et l'on peut avoir une descente droite, une descente droite et biaise, une descente rachetant un berceau, une descente en tour ronde.

Exemple : Construire une descente biaise rachetant un berceau cylindrique (Pl. 10). Supposons que la descente recouvre le parallélogramme $(abcd)$ compris entre les deux parements du mur droit et les plans verticaux projetés sur (ac) et (bd). On prend pour courbe de tête la circonférence décrite sur (ab) comme diamètre, et l'on forme les voussoirs en prenant des joints passant par l'axe du

cylindre, et par les points de division de la courbe de tête. Cette disposition est vicieuse en ce sens que les plans de joint ne sont pas normaux à la section droite du berceau. Cherchons cette section droite, faite par un plan perpendiculaire aux génératrices, plan dont la trace horizontale est ts, et la trace sur le plan vertical auxiliaire sx parallèle aux génératrices est st_1; supposons ce plan transporté parallèlement à lui-même en $(s't')$ et rabattu sur le plan horizontal.

La ligne (cd) est dans les plans de naissance de la voûte qu'il s'agit de racheter et de la descente. L'intersection du plan (tst_1) avec le plan des naissances de la descente se rabat en $s'\,o'$, le point o' étant déterminé par la condition que $\omega o'$ soit égal à so_1 (en effet, le plan tst_1, étant perpendiculaire au plan vertical auxiliaire, la distance du point o du plan horizontal au point où l'axe du berceau perce le plan tst_1 se projette en vraie grandeur sur la trace verticale st_1). Avant d'achever de construire la section droite rabattue du cylindre, expliquons comment on établira la projection sur le plan vertical auxiliaire sx. Le point e de l'axe du berceau se projette en e', et le point f en f', à une distance yf' au-dessus de la ligne de terre sx, déterminée par l'inclinaison connue de la descente. Connaissant f', la parallèle $(a'f'b')$ à (sx) sera la projection du diamètre (ab) : la nouvelle projection du point (m) s'obtient par la méthode ordinaire des changements de plans de projection, c'est-à-dire en abaissant mm', menant $(m'm'')$, perpendiculaire à la nouvelle ligne de terre, et prenant $ym''=mm'$. On construira ainsi par points l'ellipse $(a'b'm'')$ projection du cercle de tête, et la génératrice qui passe en m'' se projettera suivant $m''u$. De sorte que pour avoir le rabattement m_1 du point M sur la section droite il faudra prendre $\mu m_1 = o_1u$. Les autres points du rabattement se construiront de même. On voit bien sur ce rabattement le défaut que nous avons signalé plus haut: toutes les lignes de joint telles que $o'm_1$ passent par le centre de l'ellipse section droite : ce ne sont donc point des normales à cette ellipse.

Reste à trouver maintenant l'intersection des diverses faces du voussoir avec la voûte à racheter, voûte dont (ve) est le rayon de section droite et (ekz) le cercle de section droite. Cherchons l'ellipse d'intersection de ce cylindre avec le plan vertical projeté en $e\omega$; la génératrice dont la projection horizontale passe en j, est (ji) et (ik) est la hauteur de cette génératrice au-dessus du plan des naissances; si maintenant on rabat le plan vertical $(e\omega)$ autour de cette droite $e\omega$, le point du cylindre projeté en j se rabattra en (l) à une distance $jl=ik$. On a donc un point l de l'ellipse cherchée, et on pourra avec un papier un peu fort découper un patron ayant le profil de cette ellipse.

Veut-on maintenant avoir le point où l'arête $(m''u)$ perce le cylindre, il suffira d'imaginer le plan vertical $(m'm_1)$ lequel coupe le berceau suivant la génératrice $(m''u)$ et la voûte suivant l'ellipse dont nous avons le patron et qui se projette en vraie grandeur sur le plan auxiliaire; elle part du point z' tangentiellement à la droite $(hz'.)$ Il sera facile de la tracer et on obtiendra ainsi le point z_1, extrémité de la génératrice $(m''u)$. De même pour les autres génératrices.

On a construit finalement les projections complètes du voussoir.

La taille est facile maintenant : d'un parallélipipède rectangle, on extraira un prisme droit ayant pour base la section droite $(m_1n_1p_1q_1r_1)$ du voussoir et une longueur égale à la plus grande dimension du voussoir (les dimensions longitudinales sont projetées en vraie grandeur sur le plan vertical auxiliaire). La douelle cylindrique se tracera au moyen d'une règle se mouvant parallèlement à elle-même en s'appuyant sur les arcs (m_1n_1). Il ne reste plus qu'à faire apparaître les surfaces de tête : on indiquera au crayon sur le prisme la section

droite faite par le plan tst_1, soit u le point de cette section correspondant à m_1, on prendra sur la génératrice les longueurs um'', uz_1 qui donneront les extrémités de cette génératrice et de même pour les autres. En général, on construit le rabattement des panneaux de joint que l'on vient appliquer sur les faces du prisme droit.

Nous traiterons ce seul exemple de descente : on voit qu'il est assez compliqué. Là encore, nous répèterons que toutes les constructions sont simples et faciles et que si, le lecteur veut se donner la peine d'exécuter soigneusement l'épure en suivant pas à pas nos explications, il arrivera bien vite à posséder parfaitement la question.

ESCALIERS.

La partie d'un édifice occupée par un escalier se nomme la cage de cet escalier. On distingue les escaliers à marches parallèles et les escaliers à marches tournantes; les premiers conviennent aux grands édifices dont ils doivent être un ornement; les seconds se rencontrent partout et peuvent être à noyau plein ou à jour, ils sont seuls intéressants en stéréotomie. Nous aurons l'occasion en architecture d'exposer les principes relatifs aux dimensions des marches.

Escalier à noyau plein (planche 11, n° 1). Cet escalier est généralement placé dans une tour, dont A est le centre et DD' l'épaisseur du mur; A B est le noyau cylindrique en pierre, ou noyau plein. Il y a généralement une rampe le long du cylindre 1. 2. 3. 4; la personne qui monte dans le sens de la flèche marche donc à une distance sensiblement constante de ce cylindre; elle parcourt la ligne de foulée, généralement située à 0m,50 de la rampe; c'est ici le cercle de rayon AF. C'est sur ce cercle que les marches doivent intercepter leur largeur normale, telle qu'on puisse au moins y poser tout le pied. Divisons donc le cercle AF en parties égales, les arêtes des marches seront projetées suivant des rayons tels que A33' par exemple, menons le plan tangent XY au point 3, et développons sur ce plan le cylindre intérieur de la tour. La section de la marche dont A3 est l'arête se développera suivant (*abcde*), *ab* est la hauteur de la marche, (*bc*) est la quantité dont la marche s'appuie sur la précédente, (*ad*) est la somme de (*bc*) et de la largeur de marche, (*de*) est une hauteur de pierre suffisante pour la résistance, (*ec*) est la ligne du dessous de la marche, elle s'enroule suivant une hélice sur le cylindre. La ligne qui joint les arêtes horizontales des marches est sur le développement la droite (*lm*) et sur le cylindre une hélice dont l'inclinaison est le rapport de la hauteur (*ab*) à la largeur (*bh*) de la marche. Il faut que le pas soit assez grand pour qu'on puisse monter dans l'escalier sans se cogner à la spire supérieure : l'intervalle des deux spires doit être d'au moins 2m.00. Les arêtes telles que (*e*) sont aussi sur une surface héliçoïdale dont la ligne (*l'm'*) est la directrice en développement. La surface (*ec*) est une portion d'héliçoïde engendrée par une horizontale s'appuyant sur l'axe vertical de la tour et sur l'hélice dont *ce* est le développement. Nous avons donc tout ce qu'il faut pour déterminer la marche; elle se projette en EE'33', et vient rencontrer le noyau (AB) suivant un polygone (*abcde*) dont la figure (3) donne le développement : (*aa'*, *bc'*,) sont les développements des deux sections droites du noyau qui comprennent la marche : l'intervalle du noyau compris entre ces deux sections est formé par le prolongement même de la marche. Chaque marche porte avec elle sa portion de noyau.

La taille d'une marche est assez simple pour que nous n'ayons pas besoin de l'expliquer.

Cette forme d'escalier a le désavantage, de présenter à la vue une surface inférieure d'une discontinuité disgracieuse. Il vaut mieux la remplacer par celle que représente le n° 1 *bis* de la planche 11 :

Le profil développé de la marche se compose de la contre-marche (*ab*), de la portée (*by*), du joint (*yc*), de la surface vue (*ce'*), d'un autre joint *e'd*, et de la surface horizontale (*de*) égale à (*by*) plus la largeur de marche.

Connaissant les droites *lm*, *l'm'*, résultant des données de la construction, on prend la hauteur (*cp*) que l'on porte en (*p'e'*), ce qui détermine le point (*e'*) de telle sorte que tous les joints sont égaux. La surface vue (*e'c*) est engendrée par une horizontale qui s'appuie sans cesse sur l'hélice dont (*e'c*) est le développement et reste constamment tangente au noyau AB ; EE', CC' sont des positions de cette génératrice. On voit que par là on affaiblit beaucoup moins l'attache de la marche avec la portion de noyau qui lui est adhérente. Les plans de joints auxquels appartiennent sur le développement les courbes (*e'd*), (*cy*) sont formés par une horizontale EE' tangente au noyau et par la normale à l'intrados au point où cette droite EE' rencontre le cylindre qui sépare en deux parties égales l'intervalle BD. On a construit sur la figure 3 le développement de l'intersection de la marche avec le noyau.

Escalier en vis à jour. Il se compose de marches qui sont encastrées dans le mur de la cage à un bout seulement et qui reposent l'une sur l'autre ; elles sont terminées en dessous par une surface gauche réglée formant intrados (planche 12). Les murs de cage étant droits, leur projection horizontale forme un polygone LMNO ; menons une courbe dont ce polygone soit l'enveloppe ; la parallèle (*abcd*) à cette courbe, menée à une distance donnée, est la courbe de jour, base du cylindre vertical à la surface duquel s'arrêtent les marches. Dans chaque marche est scellé un balustre, et les balustres supportent la rampe qui se trouve à peu près à l'aplomb de la courbe de jour. Donc, à 0m,50 se trouvera la ligne de foulée, trajectoire habituelle des personnes qui montent ou descendent l'escalier. On divise la ligne de foulée en parties égales à la largeur de marche, soit 23 une de ces parties. Lorsque dans un escalier on passe d'une partie droite à une partie courbe, d'une volée droite à une volée courbe, ou plus généralement d'une volée courbe à une volée courbe de courbure différente, il se produit une variation brusque dans les largeurs des marches, si on prend toujours les arêtes des marches perpendiculaires à la ligne de foulée ; c'est cette variation brusque fort disgracieuse que l'on veut éviter par l'opération appelée balancement des marches, qui consiste à passer par petites gradations d'un changement de dimension à l'autre, et à répartir sur plusieurs marches l'angle qui existe entre les normales au point de raccordement de deux arcs de la ligne de foulée, dont les courbures sont différentes.

C'est ainsi que l'on a tracé les lignes 2, 3, 4, 5, 6... qui prolongées forment un polygone servant d'enveloppe à la courbe $\alpha\beta\gamma\omega$, que l'on trace et que l'on considère comme la base d'un cylindre vertical.

Le profil de la marche sur le cylindre qui a pour base la ligne de foulée est une donnée naturelle de la question, il est donc facile de construire la projection horizontale des arêtes 2*b*, 3*c*, R*r*, S*t*, S'*t'*, R'*r'*. Quelle est la génération de la surface du dessous des marches ? Le cylindre vertical qui a pour base la courbe 1.2.3... coupe les arêtes horizontales des marches en des points qui appartiennent à une hélice, puisque les hauteurs et les largeurs des marches sur la ligne de

foulée sont égales. On prend cette hélice pour la directrice d'une surface réglée, dont la génératrice, constamment horizontale, se meut en touchant le cylindre vertical qui a pour base la courbe $\alpha.\beta.\gamma.\omega...$, et, pour déduire de cette surface celle qui termine le dessous des marches, on suppose que, les droites génératrices des deux surfaces sont, pour chaque position, parallèles entre elles dans le même plan vertical, et que leur distance verticale ne change pas. Tout plan vertical passant par l'une des droites *a*.1, *b*.2, *c*.3 contient l'arête horizontale de marche dont cette droite est la projection, et une génératrice de la surface du dessous des marches; la distance verticale de l'arête et de la génératrice est constante. Suivant les arêtes de douelle, on substitue à cette douelle un paraboloïde tangent, on cherche la normale à ce paraboloïde à l'aplomb de la ligne de foulée, et le plan de joint est le plan de cette normale et de l'arête de douelle.

Taille de la marche. On construit le panneau (R*s* 22′ *s*′R′) qui limite l'encastrement de la marche dans le mur de la cage, et aussi le panneau développement de l'intersection de la marche avec le cylindre (*abcd*), puis on exécute le solide dont la projection horizontale est égale à celle de la marche, et dont la hauteur est *kr*′; sur les têtes de ce solide, on applique les panneaux, et la taille s'achève sans difficulté.

L'escalier précédent n'est pas capable de supporter de lourds fardeaux car les marches sont encastrées dans la cage, et n'ont guère d'autre point d'appui. Lorsqu'on veut rendre l'escalier solide, il faut recourir à une courbe rampante, que nous étudierons en charpente.

VOUTES PROPREMENT DITES.

Nous venons d'étudier les portes, les descentes et les escaliers, nous allons parler maintenant des voûtes proprement dites. Il existe pour elles plusieurs conditions indispensables à la stabilité et à l'effet architectural. Voici ces conditions: 1° le joint de deux voussoirs consécutifs doit être, en chaque point de la ligne de séparation de la surface de joint et de la douelle, perpendiculaire à cette douelle, afin que pour deux voussoirs voisins, l'angle de contact étant partout le même, la résistance de la pierre soit aussi la même; 2° pour la même raison, il est nécessaire que la surface d'un joint et les surfaces des joints qui l'environnent soient partout normales entre elles; 3° les surfaces de joint doivent être susceptibles d'être engendrées par le mouvement d'une droite, parce que dans ce cas seulement elles sont susceptibles d'une exécution parfaite, et qu'alors on n'a pas à craindre de porte à faux dans l'appareil; 4° les joints doivent être formés de surfaces développables afin que la taille puisse se faire par panneaux.

Monge a montré que ces conditions sont remplies, si l'on divise l'intrados d'une voûte en ses deux systèmes de lignes de courbure que l'on prend pour arêtes de joint. C'est là le principe qu'il faut toujours appliquer.

VOÛTE SPHÉRIQUE. (Planche 13).

Une voûte sphérique est destinée à recouvrir un espace circulaire; les pieds-droits se composent d'un mur en tour ronde, dont la demi-circonférence (*abc*) représente la demi-projection horizontale. Tout plan vertical tel que (*ab*) passant par un diamètre de la tour ronde coupe la sphère suivant un demi grand cercle (*ad′b*), qui en tournant autour de l'axe vertical de la tour engendre l'intrados de la voûte sphérique. Divisons le méridien (*ad′b*) en un nombre impair

de parties égales, et soit ($n'q'$) une de ces parties : les points de divisions engendrent des parallèles de la surface projetée, par exemple en (mn) et (pq), et ces parallèles forment le premier système de lignes de joint. Le second est normal au premier et s'obtient en divisant le cercle (acb) en parties égales et menant le méridien en chaque point de division, on prend ces méridiens pour arêtes des joints montants de la première assise : pour la deuxième assise, on prend les méridiens qui divisent les angles des premiers en deux parties égales, et on alterne ainsi les joints montants afin d'obtenir la découpe. La clef est faite d'un seul morceau, elle est engendrée par la rotation de la division médiane du méridien. Le profil méridien d'un voussoir a la forme ($n'q'r's't'$) que nous avons déjà vue pour une voûte droite, et le voussoir est la surface de révolution engendrée par ce profil et limitée aux deux méridiens verticaux (or,ov). Il est donc facile de construire les projections d'un voussoir; l'arc ($n'q'$) engendre une zône horizontale de sphère, les arêtes de joint ($n't'$) ($q'r'$) engendrent des cônes droits, la droite ($r's'$) engendre un cylindre vertical, et la droite $s't'$ un plan horizontal: les arêtes vives du voussoir sont des arcs de cercles projetés en vraie grandeur sur le plan horizontal.

Taille du voussoir :

Entourons le profil méridien par un rectangle et supposons que ce rectangle soit la projection de la pierre donnée sur le plan vertical ok : le point k' par exemple se projettera en k, et la projection du parallélipipède sur le plan horizontal sera le rectangle ($ehgf$) construit de manière à envelopper toute la projection horizontale du voussoir. La face inférieure (ωx) du parallélipipède, face qui contient les cordes mn, pq, coupe la sphère suivant un petit cercle dont (xy) est le diamètre; il est facile de tracer sur la face de la pierre ce cercle xy du point α comme centre. Ce cercle va nous servir à faire apparaître l'écuelle, c'est-à-dire la portion de sphère qu'il limite; il suffira pour cela d'une cerce en tôle découpée suivant l'arc ($xq'n'y$); on creusera l'écuelle de façon que cette cerce puisse s'y mouvoir toute entière en s'appuyant sur les bords du cercle xy. On fera apparaître la calotte sphérique. Puis on placera la corde (mn) et sa parallèle la corde (pq), dont on marquera les extrémités sur le bord de l'écuelle; on découpera des cerces suivant les arcs (mn, pq), et en les appliquant sur l'écuelle, on tracera ces arcs eux-mêmes : avec d'autres cerces, on tracera les arcs de grand cercle (mp, nq).

Reste à faire apparaître les surfaces de joint, rien de plus facile avec une équerre, dont un des côtés, au lieu d'être droit, est découpé suivant le profil du grand cercle de la sphère; on s'arrange de manière à ce que ce côté courbe reste constamment appliqué dans l'écuelle, et on fait apparaître ainsi les surfaces de joint. Sur les joints-plans situés dans des méridiens, on applique les panneaux de tête, on a donc deux horizontales telles que ($t's'$) qui servent de directrice à une règle pour faire apparaître le plan horizontal supérieur. Sur ce plan, on applique le panneau ($utvr$) que l'on a en vraie grandeur sur le plan horizontal, on trace l'arc vr, et avec une équerre qui se promène le long de cet arc, on fait apparaître le cylindre vertical dont $r's'$ est la génératrice.

PÉNÉTRATIONS DE VOUTES :

Nous avons déjà vu quelques pénétrations de voûtes dans le cas de portes ou de descentes rachetant des berceaux. Nous allons étudier maintenant les pénétrations de grandes voûtes : les grandes voûtes qui se rachètent ont mêmes naissances et sont égales en montée, c'est-à-dire qu'elles ont leurs naissances dans

un même plan horizontal, et que leurs plans tangents au point le plus élevé de chacune d'elles se confondent.

Voûtes d'arêtes :

Les voûtes d'arêtes sont destinées à couvrir l'espace compris entre quatre plans verticaux parallèles deux à deux. La section de ces quatre plans par un plan horizontal est un parallélogramme ; selon que ce parallélogramme est rectangle ou oblique, la voûte est droite ou biaise. Lorsque les plans verticaux passent seulement par les prolongements des côtés du parallélogramme et s'arrêtent aux verticales des quatre sommets, on a une voûte d'arêtes barlongue, formée par la rencontre de deux galeries indéfinies.

Lorsque les plans verticaux passent seulement par les côtés du parallélogramme, on a une salle voûtée, et la voûte est dite en arc de cloître. Sur la planche (14), la moitié supérieure du plan représente une voûte d'arêtes barlongue, et la moitié inférieure est une voûte en arc de cloître.

Occupons-nous de la voûte d'arête. On se propose de recouvrir par une voûte de cette espèce le rectangle ABCD ; on se donne un des berceaux, celui par exemple qui a pour ouverture AB et on le prend à section droite circulaire projetée en $k'a'b$. Il faut déduire de ces données la section droite du second berceau, sachant qu'il a pour ouverture AC et qu'il passe par les ellipses d'intersection du premier berceau avec les plans diagonaux AD, BC. Cherchons à construire la section droite $o_1 t_1$ de ce second berceau. La génératrice b' vient rencontrer le plan (BC) en un point b d'où part une génératrice (bb_1) du second berceau, laquelle se projette sur la section droite dont $o_1 t_1$ est la trace en un point b_1 situé à la même hauteur au-dessus de $o_1 t_1$ que b' au-dessus de $o't'$.

Veut-on la tangente au point b_1, remarquons que le plan tangent au point k' (symétrique de b') sur le premier berceau a pour trace horizontale la droite $t't$; le point t intersection de la trace du plan tangent avec le plan diagonal AD est trace horizontale de la tangente au point k de l'intersection commune des deux berceaux ; la trace horizontale du plan tangent au second berceau tout le long de la génératrice (kb) est donc tt_1 et la tangente au point b_1 de la section droite cherchée est $t_1 b_1$.

Nous avons autant de points et de tangentes que nous voulons de cette section droite. Connaissant a_1 et b_1, nous mènerons les normales en ces points, qui représentent l'intersection des joints, et nous limiterons ces joints par des lignes de rappel $(e'\varepsilon, \varepsilon\varepsilon_1, \varepsilon_1 e_1)$. L'intersection des plans verticaux $(c'd', c_1 d_1)$ nous donne le point (m) et par suite la projection (bm) d'une arête du voussoir : on obtient de même la projection de l'arête (an), et le voussoir est connu complétement en projection. On construit maintenant le panneau de la douelle P, en développant l'arc $(a'b')$ et portant perpendiculairement à ce développement des longueurs de génératrices telles que (fa) que l'on trouve en vraie grandeur sur le plan horizontal ; pour les panneaux de joints P' et P_1, on prend les longueurs $(a'e')$ $(b'c')$ et l'on porte perpendiculairement à leurs extrémités des longueurs telles que (fa) et (pn). On construit de même les panneaux relatifs au second berceau.

Pour tailler le voussoir, on prendra le bloc de pierre ayant pour section la projection horizontale $(fgmhia)$ du voussoir, et pour hauteur la distance du point b' à l'horizontale $(e'd')$. On applique le panneau de tête $(a'b'c'd'e')$ et avec une équerre on fait apparaître le joint projeté sur $(a'e')$: sur cette face de joint on applique le panneau P', et l'on marque la droite dont (an) est la projection ; on peut alors tracer la droite (nq) et abattre la partie de pierre qui dépasse le joint *ainq*. On fait de même pour le second joint projeté en $(b'c')$, mais ici il y a plus

de précautions à prendre, parce que l'angle dièdre dont (*bm*) est l'arête, est un angle rentrant, et il ne faut pas lorsqu'on taille la face (*b'c'*) dépasser les limites du panneau P_1.

Il ne reste plus qu'à faire apparaître les surfaces de douelle; pour cela on fera d'abord apparaître les faces planes obtenues en substituant les cordes aux arcs, puis avec des cerces on creusera les douelles; ou mieux encore ayant tracé l'arc (*a'b'*) sur la face de tête, on promènera une équerre le long de cet arc de manière à faire naître la douelle, mais là encore il faudra essayer fréquemment le panneau P.

La partie inférieure de la figure représente le voussoir de l'arc de cloître, pour lequel les constructions sont identiques aux précédentes.

La voûte d'arêtes en tour ronde se présente aussi quelquefois en architecture.

APPAREIL HÉLIÇOIDAL DES ARCHES BIAISES.

Nous avons étudié déjà une voûte biaise, le biais passé ou corne de vache, et nous avons montré combien cette solution était loin de la perfection. Depuis l'invention des chemins de fer, dont il n'a pas toujours été possible d'infléchir le tracé de manière à le rendre normal aux cours d'eau, il a fallu construire des arches biaises d'une grande portée satisfaisant convenablement aux conditions de stabilité.

L'équilibre d'une construction quelconque dépend beaucoup de la manière dont sont agencés entre eux les éléments de la construction. Imaginez un mur droit à assises horizontales, les pressions sont verticales, c'est-à-dire normales aux assises, et l'équilibre existe comme si le mur était un monolithe. Mais supposez les assises inclinées suffisamment, le frottement et l'adhérence des mortiers ne pourront résister à l'effort de renversement, il y aura poussée au vide et le mur tombera.

Au lieu de changer la direction horizontale des assises, modifiez la direction des pressions, chargez le mur de soutenir un bloc de terre par exemple, il y aura encore tendance au renversement, parce que la pression est oblique à la surface de séparation. Il faut donc avoir soin, dans les murs de soutènement tels que les murs de quai, d'incliner du côté des terres les plans des assises.

Prenons maintenant une voûte. Si c'est un monolithe, cette voûte subsistera en équilibre sur ses pieds-droits, mais à l'extrados il y aura des pressions et à l'intrados des tensions. Si la voûte est composée de voussoirs, en tendant à s'affaisser elle repoussera ses culées qui, si elles sont assez fortes, réagiront sur la voûte et transformeront en pressions les tensions de l'intrados. Mais ces résultats sont dus à une déformation de la voûte qui a lieu après le décintrement, et le tassement est indispensable pour qu'ils se produisent.

Le calcul montre, et on le conçoit bien, que les poussées qui tendent à renverser voûte et culées sont dans le plan de la moindre section. Pour les ponts droits les poussées se font donc dans des plans parallèles aux têtes et se reportent sur les culées; dans les arches biaises, il y a près des têtes une série de moindres sections qui ne s'appuient que sur un pied-droit de la voûte, et il se produit de la sorte ce qu'on appelle la poussée au vide, tendance au renversement en dehors du plan de tête. Ce qu'on se propose, c'est de trouver un appareil qui dévie les poussées en les ramenant autant que possible dans un plan parallèle au plan de

tête. Si on appareille les voûtes biaises comme les voûtes droites, on voit que les voussoirs ont sur les têtes des angles aigus accolés à des angles obtus : la poussée au vide rencontre donc des résistances inégales : l'appareil théorique qui rend égaux les angles des voussoirs diminue les chances de rupture.

Il est donc nécessaire que les lits de joint soient perpendiculaires aux plans de tête. Ils doivent en outre satisfaire à la condition d'être normaux à l'intrados, la raison en est facile à comprendre, si on examine une voûte droite en plein cintre, dont la clef serait limitée à des plans obliques à l'intrados; dans ce cas en effet, suivant la direction de l'inclinaison des plans, la clef tomberait ou serait chassée vers l'extrados. (Une étude rigoureuse, faite par M. Yvon Villarceau, montre qu'en réalité les joints ne doivent pas être normaux à l'intrados, mais à une courbe qui n'en diffère sensiblement que dans les plates bandes horizontales des portes ordinaires).

Peut-on satisfaire aux deux conditions de faire les lits normaux à l'intrados en même temps que normaux aux plans de tête et aux plans parallèles aux plans de tête? Oui, en prenant pour surface de joint non pas un plan, mais un cylindre ayant pour génératrices des droites perpendiculaires aux plans de tête, et dont la directrice sur l'intrados serait la trajectoire orthogonale des sections faites par des plans parallèles aux têtes. Cette solution théoriquement parfaite n'est pas acceptable pratiquement, vu les difficultés de taille : l'exécution de cet appareil serait défectueuse et l'on arriverait à de mauvais résultats, tandis qu'un appareil, théoriquement moins exact, mais plus facile à exécuter en pratique en donnera d'excellents.

Appareil orthogonal. On substitue donc aux cylindres la surface gauche engendrée par la normale à l'intrados le long de la trajectoire orthogonale des sections parallèles aux plans de têtes; cela ne change pas l'habitude des appareilleurs qui engendrent d'ordinaire les lits par le mouvement d'une normale à l'intrados.

Indiquons comment on construira l'appareil ainsi modifié :

Soit un cylindre (planche 15, figure 1) dont les pieds-droits sont projetés sur les lignes Aa, Bb; AB est la trace de la section droite, (ab) celle de la section de tête et l'angle α de ces deux droites est l'angle du biais. Généralement on prend un cercle pour section droite, et soit (AK‴B) ce cercle rabattu sur le plan horizontal; pour construire le rabattement de la courbe de tête, on mène la génératrice K‴RF jusqu'à la rencontre avec la trace (ab) du plan de tête, et l'on élève la perpendiculaire FK = RK‴, le point K est un point de la courbe de tête rabattue; on en construira ainsi autant de points que l'on voudra.

Imaginons maintenant que l'on développe le cylindre d'intrados sur le plan tangent le long de l'arête Aa et que l'on applique ce développement sur le plan horizontal. La section droite se développe suivant la droite AB, dont la longueur est égale à celle de la demi-circonférence AK‴B; le point K‴ de la section droite vient en K‴ du développement, et la génératrice, projetée en RF, vient en K‴K parallèle à Aa; le point M de cette génératrice ne la quitte pas et d'autre part reste dans un plan perpendiculaire à la charnière Aa, donc ce point M vient en K'; de même le point F de l'arc de tête vient en K sur le développement; il est donc facile, étant connu le développement de la section droite, de trouver le développement d'une section quelconque de l'intrados, et en particulier le développement de l'arc de tête, lequel est une sinusoïde dont le point d'inflexion est au milieu K. Pour vérifier la construction, on cherche par le calcul la longueur de l'arc de section droite et celle de l'arc elliptique de tête, et l'on voit si ces lon-

gueurs sont les mêmes que celles qu'on mesure directement sur le développement.

Il faut remarquer, d'une manière générale, que les angles situés dans les plans tangents à l'intrados se conservent dans le développement, car ce développement se compose d'éléments de plans tangents juxtaposés. Ainsi les trajectoires orthogonales des sections successives se transforment en trajectoires orthogonales de ces sections transformées. M. Graeff, inspecteur général des ponts et chaussées, dans un savant mémoire publié dans les annales de 1852, a calculé dans les différents cas les équations de ces trajectoires orthogonales transformées, qu'il est facile par ce moyen de construire par points.

Le principe de l'appareil orthogonal étant connu, appliquons-le à une voûte en plein cintre représentée dans la *fig.* 2; *aKb* est le demi-cercle de tête (la section droite est une ellipse surhaussée). On transporte la génératrice de naissance (*aa'*) parallèlement à elle-même en *xx*, et l'on construit les sinusoïdes développement des arcs de tête; on taille dans une feuille mince de sapin le patron de ces sinusoïdes égales qui représenteront aussi le développement de toutes les sections parallèles aux plans de tête. D'autre part, on a calculé le profil de la trajectoire orthogonale q_1Ku; on peut même se dispenser de le calculer et tracer à la main la trajectoire orthogonale des sinusoïdes; avec un peu de coup d'œil et d'habitude, on arrivera généralement à un résultat satisfaisant; le profil connu, on taillera dans une feuille de bois ce profil (q_1Ku), que l'on fera mouvoir parallèlement à lui-même le long de la génératrice de naissance (*xx*) : on pourra ainsi tracer toutes les trajectoires orthogonales, qui sont évidemment égales et parallèles entre elles. Ces trajectoires orthogonales ont un point d'inflexion qui est toujours sur la génératrice du sommet. Les voussoirs de tête se limitent à deux sections parallèles aux têtes, comme on le voit sur le développement. Les deux moitiés de la voûte étant symétriques par rapport à la génératrice du sommet, on voit que les lignes de joint ne se raccordent pas sur cette génératrice, on opère le raccordement au moyen d'une ligne comprise entre les deux tronçons, ce qui influe peu sur l'appareil.

Les projections des trajectoires orthogonales ou lignes de joint s'obtiennent facilement, en remarquant (*fig.* 1) que le point *f* est situé sur la génératrice *d'* laquelle se projette horizontalement suivant (*dg*) et verticalement suivant (*il*); donc le point (*f*) de la trajectoire orthogonale aura pour projection horizontale (*g*) et pour projection verticale (*l*). Par ce moyen, il sera facile de construire la projection horizontale et la projection verticale de la voûte représentée par la *fig.* 2. Pour les projections horizontales et verticales des trajectoires orthogonales, on peut aussi se servir de patrons. Dans le cas du plein cintre, les trajectoires orthogonales sont asymptotes aux génératrices des naissances (*aa'*,*bb'*) : s'il s'agit d'une voûte en arc de cercle, dont (MM_1, *mm'*) soit l'ouverture et KE la montée, la partie utile du développement sera comprise entre les génératrices *mm'* et $m_1m'_1$: les portions utiles de trajectoires orthogonales viendront couper les génératrices de naissance, la maçonnerie de la voûte rencontrera obliquement la maçonnerie des pieds-droits au lieu de se raccorder avec elle comme dans le cas du plein cintre, et il sera nécessaire d'établir des coussinets tels que A de la *fig.* 4. En général, dans la largeur de douelle d'un voussoir de tête, on place deux assises de moellons courants.

Quelques arches ont été appareillées par la méthode précédente, mais on voit qu'elle est fort compliquée, il est nécessaire dans la plupart des cas que l'ingénieur trace lui-même les épures; les appareilleurs exécutent mal ce qu'ils ne

comprennent pas bien. Enfin, il faut pour chaque voussoir une épure spéciale, et si l'on se trouve dans un pays comme l'Angleterre où l'on n'emploie guère que la brique, il faut pour chaque brique un moule spécial; on a donc peu à peu abandonné le système orthogonal, qu'on a presque partout remplacé par l'appareil héliçoïdal, que l'on obtient comme il suit :

On développe l'intrados; on ne construit pas les sinusoïdes représentant le développement des sections de tête et des sections parallèles aux têtes, on les remplace par leurs cordes : les trajectoires orthogonales deviennent tout simplement des perpendiculaires à ces cordes : après l'enroulement, toutes ces lignes droites formant les arêtes des joints deviennent des hélices, et les surfaces de joint sont engendrées par les normales à l'intrados le long de ces hélices; ces surfaces de joint seront donc des surfaces de vis à filet carré. Le joint sera partout identique à lui-même, et un seul système suffira pour la taille de tous les voussoirs. Un même voussoir peut en outre occuper toutes les positions. On voit que ce sont là de grands avantages pratiques; il est vrai que les joints ne sont plus exactement normaux aux têtes, ce qui est un faible inconvénient.

Pour appareiller avec des hélices la voûte de la *fig.* 2, on tirera la corde ($a'b'$) de la sinusoïde et on mènera la perpendiculaire DK'D' à cette corde. Il y a généralement une légère correction à faire : si cette ligne DK' passe par le point de division (m_1) de l'une des têtes, généralement elle ne rencontrera pas l'autre tête précisément en un point de division, alors on la déviera un peu de manière à la faire passer par le point de division le plus voisin, et c'est la ligne ainsi déviée que l'on considère comme développement de la ligne de joint. Les lignes de joint ne sont plus perpendiculaires entre elles, mais la déviation est insensible et sans influence pour la stabilité : la pose en elle-même peut entraîner des erreurs bien plus considérables.

L'obliquité des joints sur les têtes, dans le système héliçoïdal, se fait surtout sentir près des naissances dans la voûte en plein cintre; aussi lorsqu'on se sert de cet appareil, il vaut mieux prendre des voûtes surbaissées en arc de cercle. Ainsi, *fig.* 2, considérons la voûte d'ouverture (MM_1, mm') et de montée KE, son développement sera compris entre les génératrices (mm', m_1m_1'), et dans ces limites l'arc sinusoïde $m'K'm'_1$, développement de l'arc de tête, se confond sensiblement avec sa corde, puisqu'il y a un point d'inflexion entre m' et m'_1; dans cet intervalle, l'obliquité des lignes de joint sur la courbe de tête sera donc peu accusée. L'intrados de cette voûte en arc de cercle a été développé sur la *fig.* 4 qui montre bien la disposition des douelles des voussoirs. Ces voussoirs viennent s'appuyer aux naissances sur des coussinets A qui font corps avec la première assise des pieds-droits. Les projections horizontale et verticale des lignes d'assises s'obtiennent en cherchant, comme nous l'avons fait pour les trajectoires orthogonales, les projections d'une des hélices pour chaque système, et avec les profils ainsi obtenus on exécutera des patrons qui serviront à tracer les autres hélices.

La *fig.* 3 est un exemple de voûte biaise appareillée avec des hélices; nous engageons le lecteur à faire à plus grande échelle l'épure de cette voûte, afin de se rendre parfaitement compte de l'agencement des voussoirs. On voit bien sur cette figure, comment le dernier voussoir E des pieds-droits se prolonge pour former un coussinet de la voûte.

L'intersection des surfaces de joint avec les plans de tête, dans le système orthogonal et dans le système héliçoïdal, est formée de courbes, or ces intersec-

tions sont apparentes et produiraient un fort mauvais effet, on les remplace par des droites normales à la courbe de tête.

Nous empruntons au remarquable mémoire de M. Graeff, l'explication de la taille d'un voussoir dans son appareil héliçoïdal simplifié : « Dans l'appareil héliçoïdal, les lignes d'assise en douelle CE, DF, pl. 16, *fig.* 4, sont des arcs d'hélice parallèles, la ligne CD est l'arc de tête, et la ligne EF un arc d'hélice perpendiculaire aux arcs d'hélice CE, DF. Les surfaces de joint s'engendrent comme il a été dit pour l'appareil orthogonal parallèle. Quand les voussoirs ont peu de largeur, ce qui arrive toujours pour les moellons piqués de l'intérieur de la voûte, les surfaces de joint ayant pour base les lignes CD, EF de division des assises en voussoirs, peuvent, sans erreur sensible, se remplacer par des plans; mais cela n'arrive pas en général pour les voussoirs de tête.

Taille des voussoirs de tête. — Méthode par équarrissement.

Prenons pour exemple le pont indiqué par la pl. 15, *fig.* 3. La pl. 16 donne à une grande échelle les parties de ce pont nécessaires à l'intelligence des développements dans lesquels nous allons entrer.

Supposons d'abord qu'il s'agisse du voussoir C, pl. 16, *fig.* 6.

La projection verticale de la tête du voussoir, les projections verticale et horizontale de la douelle, ainsi que le développement de cette dernière, étant connus par les *fig.* 5, 6, 7, on commencera par déterminer les projections verticales de la face postérieure du voussoir et des surfaces gauches des joints; pour cela, on supposera que, suivant ce qui a été dit dans la section précédente, la surface gauche de chaque joint est engendrée par une ligne droite qui glisse le long de la ligne d'assise dans la douelle, en se dirigeant toujours suivant les rayons des cercles situés dans les plans parallèles à la tête du pont; si donc nous menons par les points f' et g', *fig.* 7, les traces horizontales des plans parallèles à la tête, ces traces rencontreront l'axe du cylindre aux points o' o'', qui seront les projections horizontales des centres des cercles situés dans ces plans; en menant par les projections verticales de ces mêmes centres, *fig.* 6, les rayons $o'f'$ et $o''g'$ prolongés jusqu'en k' et h' sur les lignes horizontales $a'k'$ et $c'h'$ passant par les points a' et c' et en menant ensuite du point h' la ligne $h'i'$ parallèle à $c'a'$, nous aurons déterminé les projections verticales des surfaces gauches $b'e'f'k'$, et $a'c'd'g'h'i'$ des joints du voussoir et de la face postérieure $i'h'g'f'k'$ qui sera aussi une surface gauche, puisque les points g' et f' ne sont pas situés dans un même plan parallèle à la tête du pont. Connaissant les projections verticales des faces du voussoir, ainsi que la projection horizontale et le développement $d'g'f'e'$ de sa douelle, *fig.* 5, 6 et 7, nous possédons tous les éléments nécessaires pour tailler ce voussoir.

Taille du voussoir : On commencera d'abord par faire débiter à la carrière une pierre en forme de prisme qui aura pour base la *fig.* $a'c'd'g'f'k'$ dans la projection verticale, *fig.* 6, et dont la longueur sera égale à la ligne $g'y'$ prise dans la projection horizontale, *fig.* 7. La *fig.* 8 représente cette pierre en perspective par les lettres $a'c'd'q'p'l'm'n'o'g'x'v'$.

On fixera sur la face $a'c'd'q'p'l'$; le panneau de tête $a'c'd'e'b'$; pris dans la projection verticale, *fig.* 6, en le faisant coïncider sur les arêtes $a'l'$, $a'c'$ et $c'd'$, et l'on tracera les lignes $b'e'$ et $d'e'$; on fera la distance $x'f'$ sur l'arête $p'x'$ égale à la ligne $x'f'$ prise dans la projection horizontale, *fig.* 7, et l'on mènera par le point f' sur la face $l'p'x'v'$ la ligne $f'k'$ parallèle à l'arête $x'v'$, et par le même point f' la ligne $f'g'$ sur la face $q'p'x'g'$. On fera de même $m'i'$ égale à $a'i'$ prise dans la projection verticale *fig.* 6, et l'on mènera $i'h'$ sur la face $m'n'o'g'x'v'$ parallèle et égale à l'arête

m'n'; on tracera ensuite sur la même face la ligne *h'g'*, sur la face *a'l'v'm'* les lignes *b'k'* et *a'i'*, enfin sur la face *d'q'g'o'* la ligne *d'g'* ; ces opérations faites, le tracé du voussoir sera terminé : pour tailler la pierre, on commencera d'abord par ébaucher la douelle en faisant passer une surface par les lignes *e'd'*, *d'y'* et *g'f'* et l'on enlèvera la partie de la pierre *d'e'f'g'q'p'*, puis par les lignes *i'k'*, *k'f* et *f'g'*, on taillera la face *i'k'f'g'h'*; par les lignes *a'c'*, *a'i'* et *i'h'*, on taillera le plan *a'i'h'c'*; enfin par les lignes *c'd'*, *d'g'*, *g'h'*, *h'c'* et *b'e'*, *e'f'*, *f'k'*, *k'b'*, on taillera les surfaces gauches des joints *c'd'g'h'* et *b'e'f'k'*. On vérifiera leur exécution en divisant, par exemple, les arêtes *b'k'* et *e'f'* en un même nombre de parties égales aux points 1 et 2, et en appliquant successivement une règle droite *n'f'* sur les points de division correspondants, comme le montre la *fig.* 8 ; tous les points de cette règle devront se trouver dans chacune de ses positions sur la surface gauche *b'e'f'k'*, qui sera, dès lors, exécutée suivant le mode de génération que nous avons indiqué plus haut.

On déterminera la douelle *d'e'f'g'* par le moyen d'un arc recourbé, suivant l'arc de cercle *d'e'* que l'on fera glisser parallèlement à *d'e'*. La surface de douelle pourra encore se vérifier au moyen d'une règle que l'on fera glisser parallèlement à la direction d'une génératrice *d's'*, et dont tous les points devront s'appliquer dans chacune de ses positions sur la surface.

Si dans l'épure, on a le soin de tracer sur le panneau de tête la direction d'une verticale *d'r'*, *fig.* 6, pl. 16, et sur la douelle, la direction d'une génératrice du cylindre *d's'*, *fig.* 5, on pourra rapporter exactement ces deux lignes sur les faces correspondantes du voussoir, *fig.* 8, en *d'r'* et *d's'*, et ces deux lignes devront toujours faire entre elles un angle droit, puisque l'une d'elles est une verticale et l'autre est une horizontale.

La méthode que nous venons d'employer pour tailler le voussoir C, et qui est connue, dans les traités de Coupe de pierres, sous le nom de méthode par équarrissement, est, sans contredit, la meilleure et la plus sûre pour arriver à la forme exacte du voussoir; mais elle a cet inconvénient que, dans beaucoup de cas, elle entraîne trop de déchet dans les pierres que l'on ne peut débiter aux carrières. Si l'on voulait l'appliquer, par exemple à la taille des voussoirs inférieurs dans la *fig.* 6, la perte de la pierre serait considérable ; aussi est-il préférable, dans ce cas, de lui substituer la méthode par panneaux.

Tracé des épures d'exécution.

Lorsque les ponts ont peu d'ouverture, on peut tracer les épures nécessaires à la détermination du développement et des projections des lignes d'assise en grandeur naturelle sur des aires en planches préparées à cet effet sur les chantiers; mais lorsqu'il s'agit de grandes ouvertures, le mouvement de longues règles pour le tracé des arcs de cercle et des lignes droites donne beaucoup de chances d'erreur. Les patrons des trajectoires sont, d'ailleurs, énormes dans certains cas, et il devient matériellement impossible de s'en servir, à moins de les couper en plusieurs morceaux, qu'il faut assembler bout pour bout, ce qui donne beaucoup d'incertitude aux tracés. On opérera toujours d'une manière plus simple et plus exacte à la fois en faisant les épures à l'échelle de 1/10 et en mesurant toutes les dimensions sur ces épures. Les chances d'erreur, dues à l'emploi d'une échelle, sont, nous n'hésitons pas à le dire, car nous en avons acquis l'expérience par la pratique, beaucoup moindres que celles qui résultent, pour l'exécution de l'épure en grandeur naturelle, des longues règles qu'on est obligé d'employer. Nous ne saurions, d'ailleurs, trop recommander aux ingénieurs qui auraient à exécuter des constructions biaises de quelque importance

de faire toujours construire préalablement un modèle en plâtre à l'échelle de 1/10 ou de 1/20, sur lequel il sera possible de tracer toutes les lignes d'assise dans leur position réelle au moyen de l'épure de détail exécutée à la même échelle, et de tailler complétement les voussoirs de tête.

On évitera ainsi les fautes d'appareil qui se remarquent souvent dans les plus beaux ouvrages, et auxquelles il est impossible de remédier une fois que la construction est terminée. C'est par ce moyen que nous avons étudié en détail les procédés qui ont été indiqués dans le cours de ce chapitre pour la taille des pierres.

Pose des voussoirs.

Pour l'appareil ordinaire, suivant les génératrices et les sections droites, les assises des moellons piqués se règlent par les génératrices qui correspondent aux points de division des arcs de tête ou des voussoirs. La pose ne présente donc aucune difficulté, les lignes d'assise étant des lignes droites sur le cylindre. Il en est autrement pour l'appareil héliçoïdal.

Pour l'appareil héliçoïdal, les lignes d'assise, qui sont des lignes droites sur le développement, sont courbées sur le cylindre. Elles se tracent sur les bois des couchis au moyen d'un cordeau ou d'une règle droite flexible que l'on tend sur le cylindre entre les deux points des arcs de tête opposés, par lesquels doit passer la ligne d'assise. Ce moyen ne serait, d'ailleurs, pas assez exact pour le plein cintre, où les lignes d'assise prennent une courbure très-prononcée sur la surface cylindrique; il demande, dès lors, à être vérifié. Cette vérification se fait en traçant sur le développement et sur le cylindre des arcs de section parallèles aux têtes, ce qui n'offre aucune difficulté au moyen des génératrices qu'on peut tracer très-facilement sur le cylindre, et dont toutes les parties, interceptées entre deux arcs parallèles aux têtes, sont toujours égales. Les points où ces arcs parallèles aux têtes rencontrent les lignes d'assises sur le développement se reportent sur les arcs de cercle correspondants établis sur le cylindre, et donnent sur celui-ci autant de points exacts des lignes d'assise. Ces lignes d'assise, étant toutes équidistantes et parallèles sur le développement, devront l'être aussi sur le cylindre; on a donc tout moyen d'en vérifier l'exactitude. Comme on ne peut d'ailleurs les tracer qu'au crayon sur le bois des cintres, elles s'effacent facilement par suite des bavures de mortier et du bardage des pierres; il est bon de les fixer, de distance en distance, par des clous visibles qui servent de points de repère pour les rétablir au besoin.

CHARPENTE.

ORIGINE ET DÉVELOPPEMENTS DE L'ART DE LA CHARPENTE.

Parmi les arts de construction, la charpente a dû naître l'un des premiers. A l'origine des sociétés, l'homme sauvage sentit bien la nécessité de se créer un abri, et pour en faire l'ossature il n'eut qu'à prendre quelques-uns des arbres qui l'entouraient de toutes parts; il forma sa cabane de pieux solidement fichés en terre et réunis par des pièces transversales qu'il attacha au moyen de branches flexibles ou de harts : les interstices furent garnis de feuillage ou de terre. Mais on s'aperçut vite que les poteaux enfoncés dans le sol pourrissaient par le pied : on se servit alors de poteaux reposant sur le sol et consolidés par un massif de pierres et par des jambes de force ; on reconnut qu'il fallait obtenir l'invariabilité de forme de l'ensemble : or la seule figure à côtés constants qui soit invariable est le triangle.

Les pièces d'une charpente bien organisée ne doivent donc, autant que possible, former que des triangles : ce principe de la triangulation régit encore aujourd'hui l'art du charpentier. Peu à peu on s'aperçut en outre des difficultés et du mauvais aspect que produisaient les croisements de pièces; on en vint à entailler les pièces lorsqu'elles se croisent, et à les réunir les unes aux autres par des pénétrations mutuelles ou assemblages. C'est au perfectionnement des outils qu'on doit ce perfectionnement de la charpente : l'invention de la scie permit de tailler et de dresser tous les bois. Les besoins augmentant sans cesse, il fallut des édifices plus vastes, des maisons à plusieurs étages, des temples monumentaux, des navires énormes dont un seul absorbait une forêt entière : la charpente devint plus compliquée, plus difficile à exécuter, ce fut un art exigeant de vastes connaissances. Aujourd'hui encore, c'est une grosse branche de l'industrie humaine; l'emploi du métal dans les constructions semble devoir réduire l'importance de la charpente, il n'en est rien ; le nouveau monde nous offre d'énormes richesses forestières qu'il faudra mettre en œuvre, et l'art du charpentier est destiné à rendre encore de longs et utiles services.

Des assemblages. Les pièces de bois équarries et réunies les unes aux autres doivent, pour la stabilité, se transmettre les pressions dans la direction de leurs axes. Lorsque deux pièces s'arc-boutent, il est donc nécessaire qu'elles aient leur

axe dans le même plan. Les entailles saillantes et creuses au moyen desquelles on rend un joint invariable s'appellent un assemblage.

Il y a trois grandes classes d'assemblages :

1° Deux pièces de bois qui se joignent peuvent faire un angle, et elles donnent lieu alors, soit à un assemblage par tenon et mortaise si l'une des pièces est limitée par l'autre, soit à un assemblage d'angle si les deux pièces se terminent à un angle commun, soit à un assemblage par entailles si les deux pièces se croisent.

2° Deux pièces de bois peuvent s'assembler bout à bout; l'assemblage porte alors le nom d'enture.

3° Deux pièces de bois peuvent s'accoler parallèlement l'une à l'autre; ce sont alors des pièces jumellées.

PREMIÈRE CLASSE D'ASSEMBLAGES.

Assemblage droit à tenon et mortaise (*fig.* 1). La pièce A pénètre dans la pièce B, au moyen d'un prisme droit occupant toute la hauteur de la pièce A et seulement le tiers de sa largeur; cette saillie est le tenon. La pièce B présente un creux égal qui est la mortaise. Le tenon pénètre dans la mortaise à frottement dur, on les assujettit par une cheville en bois ou en fer. La longueur du tenon est variable suivant la plus ou moins grande résistance qu'on veut laisser à la pièce mortaisée. Pour les charpentes provisoires, on emploie des tenons passants, c'est-à-dire traversant toute la pièce; alors on fixe le tenon par un coin au lieu de le fixer par une cheville. Les tenons ont presque toujours une forme insensible de coins, afin de faciliter l'entrée.

La *fig.* 2 représente un assemblage droit à tenon et mortaise; les bords du tenon sont taillés en biseau *ff*, afin de faciliter l'entrée. On saisit bien sur cette figure la disposition respective du tenon et de la mortaise. On appelle donner quartier à une pièce l'opération qui consiste à la faire tourner de 90° et à prendre la nouvelle projection : on a pour but de suppléer ainsi au second plan de projection que l'on ne possède pas. Ainsi la pièce A, à laquelle on a donné quartier, devient A_1 ou A_2, et la pièce B devient B_1 ou B_2.

Assemblage oblique à tenon et mortaise. C'est le même que le précédent, sauf que la pièce A est inclinée sur la pièce B au lieu de lui être normale. Dans ce cas, le tenon a pour profil le trapèze (*a*); la face supérieure du tenon (*ih*) est horizontale, tandis que la face inférieure reste parallèle aux faces de la pièce; le plan horizontal (*ih*) coupe le fil du bois.

La *fig.* 3 montre les dispositions de cet assemblage; A, A_1, A_2, A_4 sont des projections de la pièce A sur ses diverses faces, les hachures indiquent les parties où les fibres du bois sont coupées. B, B_1, B_2 donnent les projections de la pièce mortaisée.

Assemblage oblique à tenon et mortaise avec embrèvement. C'est une complication du précédent; lorsque la pièce A est arc-boutée contre B, le tenon pourrait n'être pas assez fort pour résister à la pression ; alors on fait pénétrer les faces latérales de A dans B, où existe une entaille correspondante; cette entaille a pour profil le triangle *l'k'h'*, où s'engage le triangle *lkh*, comme le montre la *fig.* 4 qui offre aux yeux les diverses projections des deux pièces. *lkh* est l'embrèvement

Assemblage oblique à tenon et mortaise avec embrèvement par encastrement. La *fig.* 5 représente cet assemblage qui ne diffère du précédent que par ce fait que la pièce A est moins large que la pièce mortaisée B; l'embrèvement se trouve encastré.

Assemblage oblique à tenon et mortaise avec embrèvement à deux abouts (*fig.* 6). Si les deux pièces A et B doivent exercer l'une sur l'autre une pression énergique, il est à craindre qu'un seul embrèvement ne suffise pas. On emploie alors l'embrèvement à deux abouts (*uvxyz*). Cet assemblage doit être exécuté avec beaucoup d'exactitude afin que les deux abouts travaillent à la fois et travaillent également.

Assemblage à tenon et mortaise avec renfort en chaperon. Il sert à réunir deux pièces qui peuvent être droites ou obliques; le renfort a pour but de ne pas trop affaiblir la pièce A. Les *fig.* 7, 8, 9, 10 et 11 donnent des exemples de renfort; la *fig.* 7 montre un renfort en chaperon, la *fig.* 9 un renfort carré. Les *fig.* 12, 13, 14, 15 montrent comment on peut assembler une pièce horizontale A soumise à des efforts verticaux avec une pièce horizontale B; on voit que les tenons sont considérablement simplifiés, parce qu'ils n'ont plus qu'à soutenir la pièce A et sa charge.

Assemblage à queue d'hironde. On désigne sous ce nom des assemblages dont les tenons, resserrés à la naissance, s'élargissent à leur extrémité, de manière à offrir l'aspect d'une queue d'hirondelle : on ne peut arracher le tenon de la mortaise par une traction dirigée dans le sens de la pièce A qui porte le tenon. On n'a pas besoin de la sorte de recourir à une cheville pour fixer le tenon. Cet assemblage est surtout employé en menuiserie.

Assemblage à queue d'hironde à mi-bois.

La *fig.* 16 donne un exemple de cet assemblage droit ou oblique. La pièce A forme avec B un assemblage droit à queue d'hironde, et la pièce E un assemblage oblique. On voit bien la forme du tenon qui va s'évasant de x en y. Si l'on donne quartier à la pièce A et qu'on la mette en A_1, on voit la projection du tenon dont l'épaisseur est moitié de l'épaisseur commune des pièces A et B, d'où le nom d'assemblage à mi-bois. La pièce B_2 représente la pièce mortaisée à laquelle on a donné quartier. Quelquefois la queue d'hironde n'est point passante : on en proportionne la longueur à la résistance. La *fig.* 17 montre l'assemblage de deux pièces A et B, dont la première est placée au-dessus de la seconde comme on le voit en A_2; la pièce A garde toute sa hauteur, seulement sur la moitié de cette hauteur on taille une queue d'hironde qui en projection se trouve cachée, mais que l'on aperçoit en donnant quartier à la pièce A. La pièce E montre une queue d'hironde non passante et d'un dessin plus compliqué.

La *fig.* 18 montre une pièce A_1 qui s'assemble avec une autre pièce B_1 au moyen d'une double queue d'hironde.

De même on emploie quelquefois des assemblages à double tenon et double mortaise, comme on le voit sur la *fig.* 19.

Assemblage à tenon et mortaise en queue d'hironde avec clef.

Si l'on veut au milieu d'une pièce de bois pratiquer un assemblage à tenon et mortaise en queue d'hironde, il faut que le tenon puisse pénétrer dans la mortaise, et l'ouverture de celle-ci doit par suite être égale à la plus grande largeur du tenon; mais celui-ci une fois entré, il existerait beaucoup de jeu entre les deux pièces si l'on n'employait une pièce auxiliaire qu'on appelle clef (*fig.* 20).

On voit sur la *fig.* 20 un exemple de cet assemblage droit et oblique, x est la clef que l'on presse avec un maillet. On a donné quartier aux pièces afin de faire bien comprendre l'agencement de cet assemblage.

Assemblage droit à tenon sur l'arête (*fig.* 21).

Cet assemblage se fait entre deux pièces carrées : l'axe de A tombe non pas au milieu d'une face de B, mais sur une arête de B, de sorte que les arêtes de contact sont telles que *xz*. La pièce A est entaillée de façon à venir emboîter B, mais on a réservé dans l'entaille un tenon dont *yy* est la base et qui pénètre dans une mortaise égale de B. Les diverses projections des pièces, avec les hachures marquées sur les parties où l'on a coupé les fibres du bois, donnent une image saisissante de l'assemblage. La *fig.* 21 suppose que les pièces carrées A et B sont de même équarrissage : si elles étaient d'équarrissage différent, l'épure ne serait pas plus difficile.

Embrèvement simple avec enfourchement.

Dans les charpentes provisoires, on emploie souvent cet assemblage simple que représente la *fig.* 22.

Joint anglais (*fig.* 23). C'est une modification du précédent : le pan *xy* de l'embrèvement, au lieu d'être plan, est cylindrique, et prend le profil *xyz*. Ce joint demande a être exécuté très-soigneusement, car si la taille est mauvaise, les surfaces ne portent l'une sur l'autre que par quelques points et la solidité est compromise.

Assemblage à oulice (*fig.* 24). Les pans de bois sont formés de pièces principales verticales qui sont les poteaux, et de pièces en écharpe destinées à assurer l'invariabilité du système qu'on appelle guettes. A la rencontre des guettes, les poteaux sont coupés et portent alors le nom de tournisses. On réunit la tournisse à la guette par un assemblage qui porte le nom d'oulice et que montre la *fig.* 24 ; c'est un tenon dont le profil est triangulaire (*xyz*) et qui occupe le tiers de la pièce J ; on a pratiqué dans la pièce F une mortaise égale au tenon

Dans la figure, les deux tournisses ont leur axe dans le prolongement l'une de l'autre : quelques constructeurs pensent que, pour la solidité, il est préférable d'écarter un peu les deux axes ; de la sorte la guette est moins affaiblie en un même point.

Assemblage à oulice avec embrèvement (*fig.* 25). C'est une complication du précédent auquel on a ajouté un petit embrèvement horizontal pour mieux répartir la pression transmise par la tournisse à la guette.

Assemblage à onglets avec tenons croisés (*fig.* 26). Cet assemblage à onglets (ou plutôt à anglets) est l'assemblage de deux pièces se terminant à un même angle. La pièce A porte deux tenons à profil triangulaire qui pénètrent dans deux mortaises de B, et réciproquement, la pièce B est garnie de deux tenons égaux à ceux de A et qui pénètrent dans des mortaises ménagées entre ceux-ci. Nous représentons un assemblage à double onglet ; il pourrait n'en exister qu'un. L'onglet s'emploie surtout en menuiserie (assemblage des pièces d'une porte).

DEUXIÈME CLASSE D'ASSEMBLAGES.

Assemblages de pièces bout à bout ou entures. Les entures servent à pallier l'insuffisance de longueur des pièces, en permettant de composer une longue pièce avec plusieurs petites. Les entures sont de forme très-variée ; toutefois elles se divisent en deux types suivant qu'il s'agit de pièces soumises à une compression ou de pièces soumises à l'extension. On les distingue encore en entures verticales et entures horizontales ; mais cette classification n'est pas rationnelle.

Enture par quartier à mi-bois (*fig.* 27). Elle est destinée à une pièce soumise à des efforts de compression. On voit que chaque pièce A et B a sa section carrée divisée en quatre carrés égaux; deux de ces carrés non adjacents restent pleins, on enlève le bois des deux autres. Au vide de A correspond le plein de B et inversement; ce qui permet aux deux pièces de se pénétrer l'une l'autre et de sembler ne faire qu'une seule pièce.

Cette enture est la plus simple : on peut la varier de bien des façons : la *fig.* 28 est une complication de la précédente; au lieu de rapprocher les surfaces par des prismes à section carrée constante, on les rapproche par des prismes à section carrée variable, formant une série de redans. Toutes ces complications nous semblent inutiles. L'assemblage de la *fig.* 27 est le meilleur, et encore, si l'on est bien certain que les pièces considérées n'ont à subir que des compressions suivant leur axe, il est plus simple de les réunir par un simple goujon de bois dur ou de métal pénétrant également dans chacun des morceaux comme le montre la *fig.* 29.

La *fig.* 30 donne encore une enture qui est une complication de celle représentée à la *fig.* 27; on voit qu'il y a au fond de chaque assemblage une sorte de rainure carrée, destinée à empêcher tout vacillement.

Enture à queue d'hironde à mi-bois (*fig.* 31). Les pièces A et B portent chacune un tenon en queue d'hironde, occupant la moitié de leur hauteur, et chacune présente aussi une mortaise égale destinée à recevoir le tenon de l'autre, comme le montre la figure. Cette enture peut résister à des efforts de traction; mais elle ne sert guère qu'en menuiserie. Les *fig.* 33 et 32 donnent des exemples d'entures que l'on rencontre quelquefois; dans la seconde, les abouts des pièces forment une sorte de chevron.

Traits de Jupiter. Lorsque les pièces doivent résister à des efforts de traction, le mode d'assemblage le plus solide et le plus connu est le trait de Jupiter avec clef. Le nom de trait de Jupiter vient précisément du profil de cet assemblage qui est brisé comme un éclair. La *fig.* 34 représente le trait de Jupiter simple; les lignes tracées sur la face A_1B_1 sont les traces de plans perpendiculaires à cette face. La *fig.* 35 est le trait de Jupiter précédent avec une clef *st*, pour le passage de laquelle on a ménagé un trou dans la pièce D. La *fig.* 36 est le trait de Jupiter avec clef et abouts en chevron; cette forme d'abouts est destinée à empêcher la pièce de se déjeter. La figure 37 donne un trait de Jupiter plus compliqué que les précédents.

TROISIÈME CLASSE D'ASSEMBLAGES.

Pièces jumellées. S'il s'agit de réunir entre elles deux pièces A et B, afin d'en faire une poutre puissante, on peut les juxtaposer en les réunissant soit par des goujons, soit par des rainures de formes diverses, comme on le voit sur la *fig.* 38; mais il est préférable, en général, de les accoler et de les serrer invariablement l'une à l'autre au moyen de frettes en fer, comme le montre la *fig.* 39. La frette se compose le plus souvent d'une barre de fer deux fois recourbée à angle droit, et dont les extrémités taraudées traversent une lame de fer (*a*); les boulons compriment cette lame et resserrent le tout. Quelquefois la partie inférieure de la frette est noyée dans la face inférieure de la pièce B.

Moises. Autrefois, moise voulait dire la moitié d'une poutre sciée en long, aujourd'hui on entend par moises deux pièces jumelles MM (*fig.* 40) qui resserrent entre elles un certain nombre d'autres pièces dont les axes sont dans un même plan. Une moise n'est jamais isolée; lorsqu'on emploie une seule pièce pour en réunir plusieurs autres, on lui donne le nom de semelle, lierne, écharpe, décharge ou lambourde, suivant sa position ou son objet. La *fig.* 40 montre que les moises sont entaillées au droit des pièces qu'elles enserrent, telles que A; quelquefois, mais c'est assez rare, les pièces enserrées telles que A sont elles-mêmes entaillées sur toute la hauteur où règnent les moises; c'est ce que représentent les pièces B et C de la *fig.* 40; on a réuni sur cette figure les diverses positions de pièces que peuvent enserrer les moises. Les deux moises sont réunies par des boulons que l'on serre fortement après la mise en place.

Les moises et les pièces qu'elles enserrent donnent un exemple de la manière dont il faut réunir deux pièces qui se rencontrent; on se sert généralement, dans ce cas, de l'assemblage à mi-bois, qui rentre dans la première classe d'assemblage et que représente la *fig.* 41.

Les deux pièces A et B sont entaillées de la moitié de leur hauteur: l'une sur sa face supérieure, l'autre sur sa face inférieure, de sorte que le vide de l'une correspond au plein de l'autre; les deux pièces peuvent donc se croiser sans qu'il en résulte de saillies disgracieuses.

Dans la troisième classe d'assemblages, rentre un assemblage employé quelquefois dans les enceintes de fondations; les palplanches s'assemblent à grain d'orge, comme on le voit sur la *fig.* 42.

Remarque. Nous venons d'exposer les différents modes d'assemblage. Les dessins, que nous avons extraits du *Grand Atlas de charpenterie* du colonel Émy, ne sont que des projections orthogonales; on y ajoute quelquefois des perspectives des différents assemblages. Ces perspectives permettent de mieux saisir d'abord la forme des pièces, mais elles ne servent point dans la pratique, et il vaut mieux s'habituer à reconstruire une pièce dans l'espace uniquement d'après ses projections qui, du reste, en donnent la représentation complète.

Il faut bien se souvenir qu'un assemblage, fût-il parfaitement taillé, est mauvais si les saillies formées dans les pièces par les entailles et les coupes ne sont pas de droit fil, c'est-à-dire exécutées parallèlement aux fibres du bois. On n'excepte de cette règle que les traits de Jupiter et les queues d'hironde.

COMPOSITION D'UN PAN DE BOIS.

Un édifice en pans de bois est composé d'un squelette en charpente; chaque face est formée de plusieurs cadres en bois, que l'on vient remplir ensuite d'une maçonnerie légère, tantôt en briques, tantôt en moellons de plâtre, tantôt plus simplement en boue recouverte d'un enduit.

C'est une construction rapide, commode, économique, on peut même ajouter durable si elle est bien exécutée ; mais on tend à l'abandonner presque partout: là où l'on ne fabriquait pas de chaux ni de briques, on en trouve aujourd'hui; les bois et surtout les grosses pièces ont augmenté de prix dans des proportions considérables. Toutefois, un ingénieur peut encore être appelé dans certains pays à construire des maisons en pans de bois, et il est utile d'en donner la composition.

PANS DE BOIS EXTÉRIEURS FORMANT FAÇADE.

Les bois au contact du sol pourrissent vite : aussi établit-on un pan de bois sur un soubassement en maçonnerie B, et l'on accède au rez-de-chaussée par plusieurs marches A; le rez-de-chaussée est ainsi exhaussé pour être à l'abri de l'humidité, car les maisons en pans de bois ne sont généralement pas élevées sur caves (*fig.* 43).

A chaque étage correspond un pan de bois partiel qui se compose d'une semelle basse S, et d'une semelle haute ou chapeau H, réunies par des montants verticaux P ou poteaux. Les poteaux qui limitent les baies, portes ou fenêtres sont des poteaux d'huisserie ; les autres sont des poteaux de remplage ou de remplissage. Les poteaux s'assemblent par tenon et mortaise dans les sablières haute et basse : pour empêcher la déformation du pan de bois dans son plan vertical, il faut le trianguler; on le fait au moyen de pièces inclinées qui s'appellent écharpes ou décharges si l'angle de ces pièces G avec les semelles est moindre que 60°, et qui s'appellent guettes dans le cas contraire.

Les pièces L qui limitent les huis à leur partie supérieure sont des linteaux; les pièces V sont les appuis des fenêtres, et les pièces U qui supportent les appuis sont des potelets. Les assemblages des guettes, des linteaux, des appuis et des potelets sont à tenon et mortaise.

On appelle trumeau la surface d'un cadre entre deux huis ; c'est la surface qu'il s'agit de remplir : lorsque cette surface est trop grande, deux poteaux auxiliaires J ou tournisses viennent s'engager avec la guette soit par un assemblage à tenon et mortaise, soit par un assemblage à oulice avec embrèvement : quelquefois encore, au lieu de tournisses, on emploie une seconde guette en sens inverse de la première, et qui vient la rencontrer à mi-bois : c'est ainsi qu'est formée la croix de Saint-André KF. Les joints à tenon et mortaise des bois inclinés les uns sur les autres sont tous à embrèvement : c'est une condition indispensable à la solidité et à l'invariabilité de l'ouvrage.

Aux angles du bâtiment, comme aussi à la séparation des diverses travées, on trouve un poteau de fort équarrissage qui règne sur toute la hauteur de l'édifice : c'est le poteau cornier C, auquel les sablières sont rattachées par des équerres en fer. Il fait saillie sur le reste du pan de bois, mais cette circonstance se prête fort bien à une décoration rationnelle de l'édifice, puisqu'elle a pour effet de mettre en relief les principaux éléments de construction.

Lorsqu'on fait des fenêtres en arc ou en plein cintre comme sur la *fig.* 43, les arrondissements sont formés par des goussets I en bois découpés en courbe et qui s'engagent à tenon et mortaise dans les poteaux d'huisserie.

Chaque pan de bois partiel supporte le plancher de l'étage supérieur : les solives de ce plancher s'appuient sur le chapeau de dessous, et supportent elles-mêmes la sablière du dessus.

Autrefois on laissait souvent les bois apparents pour les recouvrir de sculpture; aujourd'hui l'on préfère donner à l'édifice un aspect menteur en le recouvrant d'un enduit sur lequel on dessine des pierres de taille et des moulures. Dans le cas où l'on applique un enduit, il faut avoir soin de le faire adhérer au bois au moyen de rainures creusées dans celui-ci : par raison d'économie, on se contente

généralement d'obtenir une mauvaise adhérence au moyen de vieux clous dont on larde les pièces de bois et dont la tête se trouve engagée dans l'enduit.

La *fig.* 44 représente une autre maison en pans de bois, et qui est portée par des pilastres en pierre de taille occupant toute la hauteur du rez-de-chaussée; on établit sur ces piliers une très-forte pièce de bois qu'on appelle poitrail et sur laquelle vient reposer le reste de la charpente : on reporte une partie de la charge qui tend à faire fléchir le poitrail M sur les pilastres Q au moyen des écharpes ou décharges D, que l'on établit aussi au deuxième étage. On remarquera, aux grandes fenêtres du troisième étage, les liens Y qui consolident les cintres O des grandes fenêtres. Les pièces horizontales X assemblées à tenon et mortaise avec deux poteaux consécutifs sont des étrésillons s'ils sont de faible longueur, sinon ce sont des traverses.

Il est de toute nécessité, si l'on veut arriver à l'invariabilité de la charpente, que les poteaux et tournisses des différents étages se trouvent bien à l'aplomb les uns des autres; que les huis se correspondent verticalement. L'observance de ces règles ne peut du reste que profiter à l'aspect architectural.

PANS DE BOIS INTÉRIEURS.

Les pans de bois intérieurs ont à supporter une charge aussi grande que celle des pans extérieurs, mais ils ont un remplissage moins épais; ils sont moins éprouvés par les agents atmosphériques, sont percés d'ouvertures moins nombreuses : aussi fait-on ces pans de bois intérieurs plus légers, et leur épaisseur va même en décroissant à mesure que l'on s'élève.

La *fig.* 45 donne l'élévation de l'étage d'un pan de bois intérieur. P sont des poteaux qui s'assemblent sur une solive, à l'aplomb de laquelle ils doivent se trouver; S est la sablière, A les poteaux auxiliaires espacés entre eux d'une quantité égale à leur largeur, ce qui constitue la claire-voie; O est le chapeau inférieur qui supporte les solives de deux travées voisines: les solives sont écartées entre elles de quantités égales à leur largeur afin que les abouts des solives de l'autre travée puissent s'engager dans les intervalles. JJ sont des tournisses, D une guette, T une traverse, G une décharge, destinée à reporter les pressions sur la file de poteaux O; L est un linteau. On fait le remplissage des trumeaux avec de la maçonnerie légère, qui affleure les faces des pièces de bois, et là-dessus on vient faire un enduit ou ravalement; il faut laisser apparentes les pièces d'huisserie.

Cloisons légères. Enfin, la division est achevée par des cloisons légères assises en un point quelconque du plancher (*fig.* 46).

Les poteaux P sont assemblés dans les solives pour être invariables, et les sablières S ainsi que les traverses T s'assemblent dans les poteaux; on peut encore consolider par des écharpes F. Le remplissage peut se faire soit en briques ou carreaux de plâtre B posés de champ, soit en bâtons Z entourés de foin et engagés dans les rainures des poteaux puis recouverts d'un enduit de plâtre ou de torchis, soit en planches M bien dressées et assemblées à rainure et languette, soit en planches brutes Q recouvertes d'un lattis avec enduit.

Pour compléter ce qu'il y a à dire des pans de bois, nous aurions à parler des planchers mais nous aurons lieu d'y revenir en architecture.

COMPOSITION D'UN COMBLE.

Un comble est une construction en charpente destinée à supporter la couverture d'un édifice (*fig.* 47), et formée de plusieurs plans inclinés.

Les pièces de bois principales, dirigées suivant les lignes de plus grande pente du toit, sont les chevrons (*a*), qui s'engagent au sommet dans le faite *d* et à la base dans la sablière *b* ; les pièces (*e*) destinées à rejeter les eaux pluviales à l'extérieur sont des coyaux; sur le bas des coyaux, on cloue souvent une petite planche taillée en biseau qu'on appelle chanlatte. La charge par unité de surface ne varie guère d'un toit à l'autre, aussi les chevrons sont-ils ordinairement distants de 0m,40 à 0m,45; leur équarrissage est de 0,11 sur 0,11.

Les chevrons, lorsqu'ils ont trop de longueur, seraient exposés à prendre un ventre en leur milieu; on les soutient par des cours de pièces horizontales (*f*,*f*) appelées pannes (*fig.* 48, 49, et 50). Les pannes elles-mêmes sont soutenues par des pans de bois plus ou moins espacés qu'on appelle fermes (*fig.* 48, 49, 50.) La ferme se compose de pièces inclinées parallèles aux chevrons, qui sont les arbalétriers (*h*,*h*), et qui s'assemblent à tenon et mortaise avec embrèvement dans une pièce horizontale (C) ou tirant qui repose sur les murs de l'édifice. On voit que la charge du toit se transmet aux arbalétriers; la pression des arbalétriers à leur rencontre avec le tirant a deux composantes, l'une horizontale qu'annule la résistance du tirant, l'autre verticale qui comprime le mur. De la sorte, le mur n'est soumis qu'à des efforts verticaux, ce qui est le principe indispensable d'une construction stable. A leur point de rencontre, les arbalétriers s'arc-boutent à tenon et mortaise avec embrèvement, contre une pièce verticale (*g*) ou poinçon, et le poinçon se relie au tirant soit par un tenon, soit par un étrier. Sous l'influence de la charge les arbalétriers tendent à relever le nez et à soulever le poinçon: celui-ci ne s'appuie donc pas sur le tirant, au contraire il peut servir à le consolider et à en empêcher la flexion si l'on réunit le poinçon au tirant par un fort étrier en fer. A l'endroit ou l'arbalétrier porte un cours de pannes, on le consolide par une contre-fiche (*ii*): les pannes elles-mêmes sont fixées par des taquets cloués sur les arbalétriers. Quel est l'effet d'une contre-fiche ? La panne transmet à l'arbalétrier une pression transversale, mais cette pression se décompose en deux, l'une suivant l'axe de l'arbalétrier, l'autre suivant l'axe de la contre-fiche. Cette dernière est en partie détruite par la pression de la contre-fiche symétrique, il ne reste en somme que les composantes verticales exerçant sur le poinçon un effort de tension, et le poinçon réagit à son tour pour comprimer longitudinalement les arbalétriers. On voit que tout est disposé de manière à ce que les pièces de bois ne soient soumises qu'à des efforts longitudinaux. Les pièces (*ll*) sont des jambes de force. Si l'on considère le plan vertical qui passe par le faîte (*d*), ce plan contient ce qu'on appelle la ferme sous faîte qui se compose (*fig.* 49) de la pièce horizontale (*d*) qui forme le faîte, des poinçons (*g*) et de contre-fiches (*j*), qui quelquefois forment des croix de Saint-André, ou qui sont réunies par des traverses horizontales parallèles au faîte, comme on le voit sur la *fig.* 51. On voit par ce qui précède que le poids et la charge de la toiture se transmettent horizontalement sur les tirants et verticalement sur les murs à l'aplomb des tirants : il est donc de toute nécessité d'asseoir les fermes à l'aplomb des parties les plus solides de la maçonnerie,, et jamais au-dessus des portes ou fenêtres.

La *fig.* 52 représente une ferme plus compliquée que la précédente, et qu'on emploie lorsqu'on veut faire un grenier d'une hauteur convenable. La pièce horizontale (*c*) qui reçoit les extrémités des arbalétriers (*h*) s'appelle entrait; elle repose sur les deux pièces (*s*) qu'on appelle faux arbalétriers ou jambes de force, dont les extrémités inférieures s'assemblent à embrèvement dans une forte pièce horizontale à laquelle on réserve le nom de tirant. La jambe de force est réunie à l'entrait par un aissellier (*u*) sur lequel la jambette verticale (*l*) reporte la pression due à la panne (*f*). Enfin, des pièces horizontales (*y*), appelées blochets réunissent la jambe de force à la sablière (*b*): le blochet est assemblé à queue d'hironde avec clef dans la jambe de force. On remplace souvent le blochet par une tige de fer. Comme exemple de ferme plus compliquée nous donnerons encore la ferme de la *fig.* 53 où l'on retrouve les différentes pièces que nous avons énumérées jusqu'ici.

Pente des combles. C'est quelque chose d'excessivement variable suivant le climat du pays et les matériaux employés. Dans les pays chauds, où il ne tombe pas de neige, on fait des terrasses : dans nos climats tempérés, la pente varie suivant la largeur de l'édifice et le mode de couverture.

Toutefois, si on emploie des ardoises, la pente varie de 33° à 45°, et si l'on emploie des tuiles plates la pente varie de 36° à 51°. On distingue les différentes faces inclinées d'un toit par le nom d'égouts : on saisit immédiatement ce qu'est un égout de long pan, et un égout de croupe. L'égout de croupe correspond au plus petit côté du quadrilatère à recouvrir.

Il faut donner à l'égout de croupe une inclinaison supérieure à celle de l'égout de long pan, car il ne possède que des demi fermes, et la poussée horizontale des arbalétriers contre le mur est mal équilibrée par la résistance de la ferme sous faite.

Des croupes. Le plus difficile à exécuter dans une toiture est la charpente de la croupe. Quelquefois les murs latéraux sont élevés en triangle jusqu'à ce qu'ils rencontrent les égouts de long pan : les murs latéraux forment alors un pignon, que l'on prenait quelquefois pour façade principale de l'édifice (pignon sur rue). Lorsqu'il n'y a qu'un seul égout dans un édifice, cet édifice est un appentis. Le plus souvent on termine le comble par deux égouts triangulaires, ou croupes. La croupe est droite ou biaise suivant que le mur latéral est perpendiculaire ou oblique sur les murs de long pan. Dans la *fig.* 54, les égouts *bd*, *fg*, *kh* sont des croupes droites; les égouts *b'd'*. *f'g'*, *k'h'* sont des croupes biaises. Une demi ferme de croupe, telle que *sd*, *s'd'*, est une ferme arêtière : Si l'angle d'intersection de deux égouts est rentrant, la ferme dirigée suivant l'intersection, telle que (*ac. a'c'*) est une ferme de noue ; et, si les combles ont des hauteurs inégales, les noues prennent le nom de noulets ou nolets.

Dans les épures de charpente, comme les dimensions transversales sont souvent fort petites par rapport aux dimensions longitudinales, on a l'habitude d'adopter deux échelles dans les dessins, l'une petite pour les longueurs, l'autre grande pour les largeurs.

Dans une croupe droite, telle que la représente la *fig.* 55, on appelle : poinçon de croupe le poinçon (*q*), on voit en *w* le dernier chevron de long pan et au dessous le dernier arbalétrier de long pan, en *a''*, *a''* les chevrons d'arêtiers et au-dessous les arbalétriers d'arêtiers ; *o* est le chevron de croupe et au-dessous la demi ferme de croupe ; *a'*, *a'* sont les empanons de long pan ou chevrons incomplets, *o'o'* les empanons de croupe. Les pièces *p* sont des goussets qui rejoignent les tirants

Dessin d'une croupe droite (*fig.* 56, 57 et 58) :

Pour simplifier l'épure, nous ne nous occuperons que des chevrons; les constructions sont les mêmes pour les arbalétriers. Prenons un plan vertical parallèle à la dernière ferme de long pan, et soit AOA' la ligne de terre : le plan horizontal de projection est la face supérieure du tirant *t* de long pan et de la sablière *f*. Les murs se projettent suivant les lignes *fe*, *ec*, *cb* et les abouts des chevrons dans les sablières sont sur des lignes (1,3), (3,4), (4,2) parallèles aux précédentes. Déterminons d'abord la projection horizontale du sommet *c* de l'angle trièdre formé par la croupe : il sera évidemment sur la ligne médiane FC de l'édifice, et on achève de le déterminer par la condition que la pente de la croupe soit supérieure à la pente du long pan (nous avons déjà vu qu'il y avait à cela une raison de solidité, mais il faut ajouter qu'on se propose en outre de ne pas donner aux chevrons d'arêtier une longueur exagérée). Généralement, on s'arrange de telle sorte que la distance CF du poinçon à la sablière de croupe soit les $\frac{2}{3}$ de la distance CE du poinçon à la sablière de long pan ou le tiers de AE. Le point C est donc déterminé ; on en déduit les arêtes CB3, CD4, CAE qui sont les lignes de voie des pièces qui composent la croupe : la ligne de voie d'une pièce est la direction de cette pièce et la plupart du temps la projection de son axe : lorsque la ligne de voie ne coïncide pas avec l'axe, on dit que la pièce est dévoyée. Ici le poinçon est dévoyé : pour en construire la section, on prend de chaque côté de C des longueurs C*u*, C*v* égales à la moitié de l'équarrissage nécessaire pour la solidité du poinçon; les parallèles à CF menées par (*u*) et (*v*) rencontrent les arêtes CB, CD aux points 5 et 6 ; la ligne (56) parallèle au petit pan est la limite du poinçon. On complète l'équarrissage en prolongeant les lignes 6*u*, 5*v* jusqu'aux points 7 et 8, et la section du poinçon est 5.6.7.8. La ferme de long pan AE est aussi dévoyée dans le même rapport que le poinçon. Il n'y a pas de nécessité de dévoyer la ferme de croupe CF; les arêtiers sont dévoyés : pour construire leur projection, on élève au sommet 4 par exemple une perpendiculaire à l'arête C4, et sur cette perpendiculaire, on prend une longueur égale à l'équarrissage de l'arêlier, puis par l'extrémité de cette longueur on mène une parallèle à la ligne de croupe (4,3) qui rencontre la ligne des abouts au point *u* : par ce point *u* on mène la perpendiculaire *uw* à C4, et les parallèles (18, 19) (20, 21) à l'arête C4, parallèles menées par les points *u* et *v*, limitent l'arêtier.

La partie gauche de la figure 57 représente l'enrayure, c'est-à-dire le pan de bois horizontal qui supporte la charpente de croupe et qui comprend des pièces déjà étudiées telles que le tirant de long pan CA et le tirant de croupe CF : il faut aussi un tirant pour la ferme d'arêtier, et ce tirant est le coyer (*r*), destiné à recevoir le pied de l'arbalétrier d'arêtier et dévoyé comme ce dernier. Régulièrement, il faudrait prolonger le coyer jusqu'au tirant de la ferme de long pan; mais ce tirant se trouverait affaibli par une profusion d'assemblages, et l'on termine le coyer à une pièce transversale (*p*) appelée gousset : le gousset s'assemble à embrèvement avec les tirants de croupe et de long pan; sur la figure, on suppose que cet assemblage est à tenon et mortaise, mais par là, on rend plus difficile l'ajustage des pièces lorsque les deux tirants sont déjà placés. L'arêtier dont C4 est la ligne de voie, s'assemble à la partie inférieure dans le coyer au moyen d'un tenon et d'une mortaise avec embrèvement, ainsi que le montrent la projection horizontale et les projections sur un plan parallèle au plan d'arêtier, projection que représente la *fig.* 59, on a donné quartier à la pièce en (*h'*) : ce n'est que sur la figure, en la construisant lui-même avec soin, que le lecteur peut suivre les pro-

jections des diverses faces de la pièce et de l'assemblage ; les hâchures indiquent les parties du bois dont les fibres sont coupées. On a représenté en même temps que l'arbalétrier d'arêtier, l'empanon de croupe (*æ*, *æ'*) dont l'assemblage avec la sablière se fait par un simple embrèvement dont le triangle (54, N', *p'*) est le profil. La mortaise de l'empanon est indiquée aussi sur l'arbalétrier (*h*), *fig.* 59 ; sur cette figure, on voit aussi le coyer (*r*) et son assemblage avec le gousset. A la partie supérieure, l'arbalétrier d'arêtier va s'assembler dans le poinçon ; mais là, il rencontre les arbalétriers de ferme et de croupe ; il faut donc le déjoûter, c'est-à-dire le limiter aux plans verticaux (C, 18) (C, 20) : ce mode de déjoutement est dit en tour ronde. Quelquefois on emploie le déjoutement de pavillon que l'on remarque sur la pièce (*h'*) de la *fig.* 58 : l'arbalétrier d'arêtier est prolongé un peu au delà des points où il rencontre les arbalétriers de ferme et de croupe, puis on retourne ses faces latérales parallèlement aux arêtes de ces arbalétriers ; les lignes 32, 33, 34 montrent cette disposition en plan. L'arbalétrier de la *fig.* 57 est déjouté en tour ronde, et il touche le poinçon par les faces verticales (15, 30) (15, 31) qu'on appelle faces d'engueulement. Entre les points 5 et 15 (*fig.* 56) règne une petite face horizontale par laquelle l'arbalétrier s'appuie contre le chapeau du poinçon. La *fig.* 59 montre les projections de l'assemblage du poinçon et de l'arbalétrier, et si l'on donne quartier à ce dernier en (*h'*), on voit très-bien la disposition du déjoutement et de l'engueulement. Nous invitons le lecteur à exécuter soigneusement cette épure, qui n'offre aucune difficulté théorique, puisqu'il s'agit simplement de rapporter des points d'une figure sur l'autre au moyen de projetantes. Il est à remarquer que les arbalétriers sont délardés à leur partie supérieure parallèlement aux pans de long pan et de croupe, afin de permettre de poser les pannes sur les arbalétriers sans encastrement ; la section de cet arbalétrier est pentagonale.

On appelle pièces délardées ou débillardées celles dont les faces ne sont pas à angle droit les unes sur les autres : le type de la pièce délardée est la pièce à section parallélogramme.

L'arbalétrier de long pan, dont CE est la voie, n'a pas lui-même la forme ordinaire ; il possède une face de déjoutement ; (*a*) en est la projection verticale, et en (*a'*), on lui a donné quartier afin d'en bien montrer les dispositions (*fig.* 56).

Croupe biaise (*fig.* 60 et 61).

Les pièces sont dévoyées comme dans la croupe droite, et on construit de même la section du poinçon ; seulement cette section est un trapèze au lieu d'être un carré. On construit comme plus haut les projections des arêtiers et des arbalétriers de long pan. Pour les empanons, il y a deux solutions à adopter : 1° on peut, comme on le voit sur la *fig.* 61, conserver à l'empanon son équarrissage, mais alors la face supérieure étant dans le plan de l'égout de croupe, les faces latérales seront perpendiculaires à cet égout, mais elles ne seront pas perpendiculaires au plan horizontal et en projection les quatre arêtes de l'empanon seront distinctes, ainsi qu'on le voit en *æ* ; 2° on peut, au contraire, comme le montre la *fig.* 63, délarder l'empanon *æ* sur ses faces latérales, les quatre arêtes ont alors deux à deux même projection horizontale, mais la section de la pièce est un parallélogramme. Dans le premier cas, l'empanon est de devers, il est déversé, dans le second cas, il est délardé.

Épure de l'empanon déversé (*fig.* 61) :

Supposons que (*pr*) soit la projection de la ligne médiane de la partie supérieure de l'empanon. Par la verticale C menons un plan perpendiculaire au toit de croupe et rabattons ce plan dont CQ est la trace horizontale sur le plan hori-

zontal : on connaît la hauteur CZ, il en résulte que QZ ligne de plus grande pente de la croupe est connue : par le point *p* passe un plan parallèle au plan CQ, et ce plan a pour trace horizontale la ligne (*pq*) ; d'autre part, le point *p*, appartenant à l'égout de croupe, se projette en P sur le plan de profil CQ. Si l'on rabat le plan de croupe projeté horizontalement sur le triangle (3C4) sur le plan horizontal, le point Z vient en Z', la distance QZ' étant égale à QZ ; la perpendiculaire en P à la toiture est PS, et le point S est sa trace horizontale sur le plan de profil. Donc la perpendiculaire menée au toit par le point (*p*) a sa trace en S' sur le prolongement de (*pq*). Le plan mené par la droite (*pr*) et par la perpendiculaire *p*S' au toit est parallèle aux faces latérales de l'empanon, et a pour trace horizontale la droite S'*r* (joignant les traces de deux droites qu'il renferme).

Le point (*p'*) de Z'4 est le rabattement de (*p*) sur le plan horizontal, et (*p'r*) est le rabattement de (*pr*) ; prolongeons (*p'r*) et en un de ses points *x* menons-lui une perpendiculaire sur chaque partie de laquelle nous prenons des longueurs *xz*, *xy* égales au demi équarrissage ; par les points *z* et *y* menons les parallèles (*z*-51), (*y*-52) et ramenons le plan (3Z'4) dans sa vraie position : les points 51 et 52 se trouvant sur la charnière ne bougent pas, et les deux arêtes de l'empanon situées dans le plan du toît sont (51-51') (52-52').

Les faces latérales de cet empanon rencontrent le plan de la sablière suivant les droites (52-53) (51-54) parallèles à S'*r*, et par les points 53 et 54 passent les deux autres arêtes de la pièce. Pour avoir le tenon, on divise les intervalles (52'-53') (51'-54') en trois parties égales et le tenon occupe la division du milieu ; à droite, la face latérale du tenon est parallèle à la face de l'empanon dont elle est le prolongement ; à gauche, la face du tenon et par suite ses arêtes sont normales à la face verticale de l'arêtier. Le tenon est limité au plan vertical dont la ligne pointillée (56-57-55-58) est la trace. La *fig.* 62 donne la projection de l'arêtier et de l'empanon sur le plan d'arêtier ; on rapporte les points sur les génératrices correspondantes au moyen de projetantes. Sur cette *fig.* 62, l'about (57-58) du tenon, about normal à l'arêtier et passant par la ligne (51'-54') se projette sur cette ligne même. On voit, par cette explication un peu longue, combien cette épure de l'empanon déversé, qui paraît si complexe au premier abord, est simple et facile à comprendre.

Cet empanon s'engage à embrèvement dans la sablière, et l'embrèvement a pour profil perpendiculairement à la croupe un triangle rectangle dont (51-54) est la base et dont l'angle droit est au point 51. La *fig.* 64 représente la projection (*æ*) de l'empanon sur le plan du toît rabattu en (Q4Z') et transporté parallèlement à lui-même. Si du point *f* de la *fig.* 61 on abaisse *fh* perpendiculaire sur QZ, la distance Q*h* est égale à la distance qui sépare le point 51, de la projection du point 54 sur le toît. On peut donc par là construire la projection (51-52-53-54) de la base de l'empanon sur la *fig.* 64. On prend de même les longueurs (4*w*, 4*n'*) que l'on trouve en vraie grandeur sur la *fig.* 61, le point *n* vient sur la *fig.* 64 en un point *n* tel que *n'n* = Q*h*. On a donc la projection de la ligne (53'-54'). D'autre part, en projetant la ligne (51'-54') de la *fig.* 61 sur la ligne QZ, on obtiendra une longueur que l'on portera en (51'-54') sur la *fig.* 64 ; on divisera cette longueur en trois parties égales et par des parallèles à (54'-53'), on aura la base du tenon.

On obtient de même les points (55, 56), par lesquels on mène des parallèles à (1-3, 2-4), et on prend les longueurs (55-57) (56-58) que l'on trouve en vraie grandeur sur la *fig.* 61. Sur la figure 64, la hauteur (*qb*) de l'embrèvement se trouve projetée.

Sur la *fig.* 64, on a encore représenté la projection de l'empanon sur un plan de profil tel que CQZ.

Epure de l'empanon délardé.

Les *fig.* 63 et 65 représentent une croupe biaise pour laquelle on a biaisé aussi la dernière ferme de long pan. La *fig.* 63 montre comment on peut dévoyer l'arbalétrier (C-4); on porte sur la perpendiculaire (4-*q*) à la ligne de voie une longueur (4-*q*) égale à l'équarrissage de l'arbalétrier, on mène ensuite la droite (*qu*) parallèle à (4-3) et (*u*, *w*) limite l'arbalétrier.

L'empanon délardé a pour projection horizontale de ses faces latérales les droites (51-55) (52-58), il s'engage à embrèvement dans la sablière et à tenon et mortaise dans l'arbalétrier d'arêtier. La *fig.* 66 donne en *æ* la projection de l'empanon sur un plan parallèle à ses faces latérales. La ligne MG est la trace du plan supérieur des sablières; le point 4 se projette en M, et si au point G on élève GH = CZ (hauteur du poinçon), la ligne MH est la projection de l'arête C4 sur le nouveau plan de projection, et les arêtes (55-58) (55'-58') de la face de contact de l'empanon avec l'arbalétrier sont parallèles à MH. Si on imagine le plan vertical CK et qu'on le rabatte, le sommet du poinçon viendra sur la ligne CS à une distance connue en un point *x*, et la droite K*x* représentera l'intersection du toît de croupe par un plan parallèle aux faces latérales de l'empanon. Cette droite K*x*, non marquée sur l'épure, sera la direction des arêtes de l'empanon sur la *fig.* 66. Les points (51-52-53-54) se projettent sur la ligne MG; aux points 51 et 52 on élève des perpendiculaires (51-51') (52-52') égales à l'about de l'embrèvement, et la face de cet embrèvement se trouve projetée sur le parallélogramme (51'-52'-53-54). Les points 55 et 58 s'obtiennent par des lignes de rappel. On construit de même les arêtes du tenon. La *fig.* (*æ'*) est la projection de l'empanon sur le toît de croupe; on la construit comme nous avons fait pour l'empanon déversé.

Cintres et ponts. Bien que nous n'ayons donné que quelques exemples de combles, nous ne saurions aller plus loin sans dépasser les bornes qui nous sont imposées. Les cintres et les ponts en charpente sont des formes de combles particulières; nous nous réservons d'en exposer les principes dans le cours de ponts.

ESCALIERS.

Composition d'un escalier. Un escalier réunit les divers étages d'un édifice : on appelle marche un plan horizontal où l'on pose le pied; la partie antérieure d'une marche s'appuie sur la partie postérieure de la marche précédente au moyen d'un plan vertical appelé contre-marche. Le giron est l'espace libre sur lequel on peut poser le pied. L'échappée d'un escalier est la distance d'une marche à l'intrados de la volée supérieure. Un escalier est dit à repos lorsqu'il est formé de marches implantées dans deux murs; il est dit en vis à jour, lorsque les marches ne sont engagées que par un bout dans le mur de la cage : par l'autre bout elles sont réunies au moyen de pièces en charpente qu'on appelle échiffres.

A chaque étage existe un palier; dans les escaliers courbes on réserve de place en place une marche palière, plus large que les autres. La marche qui accède à un palier est la marche d'arrivée, celle qui part d'un palier est un remontoir.

La partie droite d'un escalier est une volée; la partie courbe est un quartier

tournant. Dans les quartiers tournants les arêtes des marches ne sont pas parallèles : on maintient toutefois la largeur du giron constante sur la ligne de foulée, située à environ 0m,50 de la rampe : la ligne de foulée s'appelle aussi courbe de gironnement. Le collet d'une marche est sa largeur près de l'échiffre.

La hauteur des marches est d'ordinaire 0m,16; les limites extrêmes sont 0m,13 et 0m,19; dans les petits escaliers, où l'on a peu de place pour gravir une grande hauteur, la marche a jusqu'à 0,20 et 0,22 et même près de 0,30 dans les escaliers de ports de mer.

Lorsque la hauteur des marches augmente, il faut diminuer le giron, afin que la fatigue ne soit pas augmentée. Si l'on admet que la fatigue pour avancer de L est la même que pour monter de $\frac{L}{2}$, on peut admettre que la hauteur de marche et le giron sont liés par la relation :

$$G + 2H = 0^m,64,$$

qui est établie en partant de ce fait que nous parcourons sans fatigue 0m,64 en plan, et 0m,32 seulement en élévation. Cette formule donne une compensation satisfaisante : mais généralement on lui préfère la formule $G + H = 0^m,48$ à cause de sa simplicité.

Escalier anglais (*fig.* 67). On nomme escalier anglais un escalier sans limon : les marches sont massives et s'appuient les unes sur les autres comme des voussoirs; nous avons déjà vu un exemple de cet escalier dans la coupe des pierres, et nous avons dit pourquoi il n'était pas solide. Construit en bois, il est encore moins propre à recevoir de fortes charges, vu la flexibilité des marches qui, se trouvant encastrées dans le mur de la cage, travaillent toujours en porte à faux; la *fig.* 67 montre un escalier de ce genre : la moulure de la marche est continuée en retour, et l'on voit que les marches s'emboîtent les unes sur les autres.

C'est pour avoir l'aspect de cet escalier que l'on a construit quelquefois le limon en crémaillère de la *fig.* 68; c'est une pièce de bois qui est taillée en redans (*mke*), contre lesquels viennent s'appliquer les marches et contre-marches que l'on fixe au limon par des clous ou des vis, et qui généralement sont garnies de moulures.

L'escalier anglais s'emploie encore quelquefois comme le représentent les *fig.* 69 et 70 : les marches massives sont réunies deux à deux par des boulons qui les traversent, et dont les têtes sont noyées dans le bois comme l'indiquent les lignes pointillées.

Aujourd'hui, par mesure d'économie, on ne fait plus les marches massives : la *fig.* 71 montre comment la contre-marche est assemblée à rainure et languette dans les deux marches adjacentes. L'épaisseur des marches est généralement de 0m,05; à leur partie antérieure elles portent une moulure formée d'un quart de rond de 0m,03 et d'un filet de 0m,01, ce qui fait une saillie totale de 0m,04. L'épaisseur de la contre-marche est de 0m,03, celle de la languette de 0m,015. Lorsqu'il faut donner aux marches une grande solidité, elles ont jusqu'à 0m,08 et 0,09 d'épaisseur; mais l'excès d'épaisseur est dissimulé derrière la contre-marche.

Balancement des marches. Sans nous arrêter aux combinaisons d'escaliers droits, nous prendrons immédiatement le cas d'un escalier formé de volées droites réunies par des quartiers tournants, et nous nous proposerons de faire l'épure des marches et du limon de cet escalier (*fig.* 72).

Soit ABDE le rectangle qui limite la cage d'un escalier; l'arête de la première

marche, comme aussi celle du palier du premier étage est à l'aplomb de la ligne AE. Nous prenons le centre C du cercle tangent aux trois côtés de la cage; l'axe du quartier tournant se projettera en C. S'il s'agit d'un escalier, dont la largeur ou emmarchement est ordinaire, la ligne de foulée sera à 0m.50 du limon : dans un escalier de large emmarchement on place la ligne de foulée au milieu, car alors on ne se sert guère de la rampe. Soit donc (1, 2, 3, 4... 19, 20...) la ligne de foulée. Les faces verticales du limon seront comprises entre deux cylindres verticaux parallèles entre eux et parallèles au cylindre de la ligne de foulée : la face intérieure du limon se projettera donc en (3', 4', 5'... 20', 21'). Si on donnait aux arêtes des marches du quartier tournant les directions aa', bb'... qui passent par le point C, les collets des marches près du limon tournant seraient trop étroits pour qu'on pût y poser le pied, et de plus on passerait brusquement du collet large de la volée au collet très étroit du quartier tournant, ce qui produirait un effet disgracieux. On change donc la direction des arêtes d'une manière insensible en répartissant le passage de la direction (4-4') des marches de la volée à la direction Pp' (milieu du quartier tournant), en la répartissant, disons-nous, non seulement sur les marches du quartier tournant, mais aussi sur les dernières marches de la volée. On obtient ainsi une transition insensible, et cette opération s'appelle le balancement des marches, voici comme on l'exécute :

Développons (*fig.* 73) le cylindre intérieur du limon; en supposant que le balancement ne soit pas fait, de 3' en m, les arêtes des marches rencontreront le limon suivant la droite qui, dans le développement est ($3'm'$) : on a sur la *fig.* 72 la projection horizontale ($3'm$) de cette droite, et la hauteur mm' est déduite du nombre des marches qui existent entre le point 3' et le point m'. Les arêtes des marches du quartier tournant rencontrent le limon sur une hélice qui, dans le développement, est la droite ($m'p'n'$) : cette droite est plus rapprochée de la verticale que la droite ($3'$-m'); en effet, la tangente de l'inclinaison de celle-ci est le rapport de la hauteur d'une marche à sa largeur, tandis que la tangente de celle-là est le rapport de la hauteur de la marche à la largeur du collet, et le collet est moindre que la marche. Sur la *fig.* 73, la droite ($n'o'$) est parallèle à ($3'm'$) et correspond à la seconde volée droite.

On voit d'après cela que le profil du limon aurait pour développement la ligne brisée ($3'm'p'n'o'$), ce qui produirait un aspect déplorable : élevons en p' une perpendiculaire ($p'l$) à $m'n'$, et en (u), point où commence le balancement, une perpendiculaire us à ($3'$-m'); ces deux perpendiculaires se rencontrent en un point d'où l'on décrit l'arc de cercle ($um''p'$) que l'on prend pour profil du limon : pour la partie symétrique, on prend l'arc égal ($p'n''o'$) dont la courbure est en sens contraire. Comme les plans horizontaux des marches sont marqués sur le développement, on les prolonge jusqu'à la rencontre de l'arc ($p'm''u$) par exemple, on a donc les largeurs successives des collets des marches, qu'il suffit de porter à partir de p' sur la *fig.* 72 pour obtenir les points (11'-10'-9'...); les points (11-10, 9...) de la ligne de foulée n'ont pas varié. Nous avons donc construit les arêtes (9-9', 10-10'...) des marches balancées.

Ce que nous venons de faire est une construction graphique très-simple : on a donné des formules s'appliquant à tous les cas de balancement, mais il vaut mieux les laisser de côté. On emploie quelquefois le balancement arithmétique : appelons (l) la longueur du limon sur laquelle on veut faire porter le balancement, (c) le plus petit collet qu'on veuille admettre, (r) l'accroissement constant d'un collet au suivant, les collets successifs seront c, $c + r$, $c + 2r$, $c + 3r$...

$c + (n\text{-}1)r$, et si G est la largeur du giron, on aura les deux équations

$$l = c + (c + r) + (c + 2r)\ldots + (c + (n\text{-}1)r) \qquad G = c + (n\text{-}1)r.$$

De ces deux équations on déduit (r) et (c) : si l'on trouvait pour (c) une valeur trop petite, on augmenterait (l) et par suite le nombre (n) des marches balancées. Cette méthode, qui nécessite l'addition de quelques centimètres d'un collet à l'autre, est une cause d'accumulation d'erreurs, et elle est toujours inférieure à la méthode graphique. Il faut prendre garde, pour vouloir trop bien faire, de répartir le balancement sur un trop grand nombre de marches : la vue de marches convergentes en une partie de volée droite, où l'œil n'en saisit pas la nécessité, est toujours d'un effet choquant.

La *fig.* 74 est la projection de l'escalier sur le plan vertical BD; on voit bien la forme du limon : les marches de l'escalier considéré sont massives. La *fig.* 75 est la vue de face du limon de volée : on a marqué en pointillé l'encastrement des marches dans le limon; la pièce B est le patin de l'escalier, que l'on rattache encore au limon au moyen de la jambette E. Le patin B pénètre dans un prolongement R de la première marche et y est énergiquement maintenu. Généralement, la volute qui termine le limon au-dessus de la marche palière ou remontoir R (*fig.* 72) est taillée dans le bloc du patin B (*fig.* 75) et le limon vient s'appuyer sur cette pièce B par le joint brisé (*mon*).

Le remontoir est généralement taillé dans une pierre dure, et se termine par une courbe régulière (la spirale d'Archimède, ou la spire logarithmique, ou la développante du cercle).

La *fig.* 74 donne la projection du limon dans le quartier tournant : pour la construire, on a sur la *fig.* 72 la distance d'une extrémité de l'arête d'une marche au plan vertical PQ, et d'autre part, on a l'ordonnée verticale du même point d'après le numéro de la marche à laquelle il appartient; on a donc les deux coordonnées du point et on peut le construire. En ajoutant aux verticales les distances verticales qui séparent une arête de marche des faces inférieure et supérieure du limon (distances données par la *fig.* 75), on construit définitivement les quatre arêtes du limon.

Nous avons déterminé, sur la *fig.* 73, le développement (*um''p'n''o'*) de la ligne du limon qui passe par les extrémités des arêtes des marches : les arêtes du limon sont parallèles à cette ligne, et ses faces inférieure et supérieure appartiennent à une surface gauche engendrée par une droite horizontale qui s'appuie sur les arêtes tout en restant normale au cylindre vertical des faces latérales du limon. On voit que cette surface gauche, quoique ayant même directrice que la surface gauche à laquelle appartiennent les arêtes des marches, n'est pas la même puisque les arêtes des marches ne sont pas normales au cylindre de jour. Pour chacune des génératrices C*m*, C*n*, il y aura donc des jarrets sur les faces du limon; mais le charpentier a soin de laisser un excès de bois en cet endroit afin de faire le raccordement.

Théoriquement, on devrait prendre pour les surfaces inférieure et supérieure du limon des surfaces parallèles à la surface gauche qui contient les arêtes des marches; mais on trouve plus de facilités à opérer comme nous venons de dire plus haut, sans qu'il en résulte grand inconvénient.

Le joint projeté en (*abcd*) de la *fig.* 74 se projette en 12'' de la *fig.* 72, où il est représenté par des lignes ponctuées et des hâchures. Le joint représenté en (*aelk*) sur le développement (*fig.* 73) est représenté en plan au point Z de la *fig.* 72.

Des joints du limon. Pour les joints de volée, on adopte des plans normaux aux faces latérales du limon et passant par le profil (*uvxy*) (*fig.* 76); mais généralement, pour obtenir plus de fixité, la partie A possède un tenon qui s'engage dans une mortaise de B, et B à son tour possède un tenon qui s'engage dans A. Les joints dans les parties courbes sont composées comme il suit (*fig.* 77 et 78) : par le milieu de la hauteur (*b'b''*) du limon, on mène la normale (*bd*) à la surface latérale du limon; par le centre du rectangle générateur du limon (rectangle projeté sur *b'b''*), on mène la tangente à l'hélice engendrée par ce centre, et le plan qui contient la droite (*bd*) et cette tangente est le plan de joint projeté en (*vx*), il est limité aux horizontales (*v*) et (*x*), par lesquelles on mène les plans (*xy*), (*vu*) normaux à *vx*. Ces plans de joint coupent les faces inférieure et supérieure du limon suivant des courbes qui diffèrent peu d'une ligne droite.

Projections d'une pièce de limon courbe (*fig.* 79, 80, 81, 82). Considérons un escalier à quartier tournant circulaire et supposons, pour plus de facilité dans l'exécution de l'épure, qu'on n'a pas fait le balancement. Les arêtes des marches rencontrent le cylindre intérieur du limon aux points (1.2.3.4.5.6...) et les plans horizontaux des marches se projettent verticalement suivant des parallèles à la ligne de terre (*oo*), parallèles équidistantes (1-1, 2-2, 3-3...). Si par les points (1.2.3.4...) des marches, on imagine des verticales, elles rencontrent l'arête intérieure supérieure du limon à une hauteur constante qui est connue, ce qui permet de construire les projections verticales (1'-1', 2'-2', 3'-3'...) des génératrices de la surface gauche de la courbe rampante. L'arête intérieure supérieure du limon a ses points à l'intersection de la ligne (5'5'') avec la verticale élevée au point 5 du plan; par exemple, 5'' est un de ces points. On peut donc construire cette arête. On construit en même temps l'arête supérieure extérieure, en ramenant sur les horizontales les points tels que 1' du plan. Les arêtes inférieures sont à des distances respectives des précédentes égales à la hauteur du limon, il est donc facile de les construire : on a alors les quatre hélices engendrées par le rectangle qui est la section verticale du limon. Supposons que l'axe d'un joint soit dirigé suivant le rayon CZ, et faisons une projection auxiliaire sur un plan vertical perpendiculaire à ce rayon. Prenons le point (*b*) de la *fig.* 81 comme centre du joint; la hauteur du limon étant *fd*, les quatre arêtes du limon donneront en projection une figure identique à la partie médiane de la figure 80. Pour déterminer le plan de joint projeté sur *vx*, il faut trouver la tangente à l'hélice médiane du limon au point (*b*); traçons l'horizontale (*mt*) (*fig.* 80) par le centre (*c*) du rectangle générateur du limon, la sous-tangente (*mt*) de l'hélice correspondant au point (*b*) est, comme on sait, égale au développement de l'arc de cercle (*rz*) compris entre le point *b* et l'origine de l'hélice, donc (*tb*) est la tangente, que l'on peut rapporter en (*t''b*) sur la *fig.* 81. Le joint sera (*vx*) et se retournera suivant les faces *xy*, *vu*, normales à la première. En (*x* et *v*) sont projetées des horizontales, (*yy'*) et (*uu'*) sont des courbes : on déduit de la *fig.* 81 la projection du joint en plan, et de la projection du joint en plan, on déduit la projection sur la *fig.* 80, en remarquant que le point *x* par exemple est à une certaine hauteur au-dessus de l'arête inférieure du limon. On fera de même pour le joint CZ', et le morceau du limon est complétement connu.

Nous engageons le lecteur, dans une première épure, à laisser de côté les tenons et mortaises, bien que les projections en soient faciles à déterminer.

Taille d'une partie de limon. La pièce de laquelle il faut faire sortir le limon est un parallélipipède droit, soigneusement dressé et équarri, qui se projette verticalement sur le rectangle DED'E' (*fig.* 80) et horizontalement sur le rectangle

(AEB'D') : les faces latérales DE, D'E' se projettent horizontalement sur les rectangles ABDE, A'B'D'E' dont on a couvert les contours de hâchures.

Pour plus de clarté, nous transportons la projection horizontale parallèlement à elle-même de la *fig.* 79 à la *fig.* 84 et la projection verticale parallèlement à elle-même de la *fig.* 80 à la *fig.* 83.. Sur la *fig.* 83, nous rabattons les faces rampantes AEA'E', BDB'D' de chaque côté de la pièce autour de leurs côtés extérieurs. Les cylindres latéraux du limon rencontrent ces faces suivant des ellipses parallèles qu'il est facile de construire par points : par les points (*mm*) de la *fig.* 84 on mène les verticales jusqu'en *ff'* à la rencontre de la face EE'; si l'on rabat cette face, les points (*m*) et (*n*) des ellipses viendront sur des perpendiculaires à EE' à des distances $fn = qm$, $f'm = pm$; on détermine les sommets *dd'* des petits axes par la verticale des points (66') qui rencontre EE' en (*r*); en prolongeant (*d'r*) d'une quantité ($ro = r'C$) le point *o* sera le centre des ellipses; (*ab*) (*a'b'*) projections des diamètres (1-11) (1'-11') sont les grands axes; on peut donc si l'on veut tracer les ellipses et construire les panneaux AEA'E', BDB'D', que l'on appliquera sur la pierre; on a marqué sur chaque ellipse les points correspondants à une même verticale, de sorte qu'avec une règle, il sera facile de faire apparaître les faces latérales du limon. On détermine de même les ellipses d'intersection de ces cylindres avec les plans d'about DE, D'E' de la pièce de bois (quelquefois on se dispense de ces ellipses qui se trouvent formées par la taille et ne sont guère qu'un moyen de vérification). Ceci fait, on détermine exactement sur les deux cylindres la position de la verticale (*rc*) et celle du milieu de cette droite. D'autre part, on a construit (*fig.* 85) le développement des cylindres concave et convexe; (*mGm'*) est la demi-circonférence extérieure, *nGn'* la demi-circonférence intérieure : sur *mb'* on prend quatre hauteurs de marche, sur (*mf*) quatre largeurs de collets extérieurs et sur (*mg*) quatre largeurs de collets intérieurs, les droites *b'f*, *b'g* sont parallèles au développement des hélices qui forment les arêtes du limon : les parallèles menées par les points (66') à ces droites sont donc les développements des hélices. Sur ces hélices on détermine par des horizontales les projections des marches et aussi les lignes de joint (*uvxy*). On a donc deux panneaux que l'on applique sur les cylindres en faisant coïncider la droite (66') avec (*rc*), et l'on trace à la craie toutes les lignes limitant le limon, qu'il est alors facile de tailler au moyen de règles qui joignent les points correspondants.

ÉQUARRISSAGE DES PIÈCES DE CHARPENTE.

« Les arbres de plaine, qui reçoivent de tous côtés l'air et le soleil, ont une forme conique très-prononcée, et l'on n'utilise que la partie du tronc qui s'arrête aux grosses branches : les arbres venus en forêt ont une forme presque cylindrique, et ont une hauteur sous branches souvent très-grande : on ne peut donc avoir aucune incertitude sur la portion à employer.

L'arbre, une fois abattu et dépouillé de ses branches, est placé sur des chantiers, pièces de bois entaillées à leur partie supérieure et espacées à des intervalles suffisants pour que l'arbre n'éprouve pas de flexion par son propre poids (*fig.* 86 et 87). On consolide l'arbre à l'aide de coins, on donne ensuite un trait de scie à chaque extrémité perpendiculairement à la longueur de l'arbre, et pour cela on place à chaque extrémité un fil à plomb passant à peu près par l'axe de la pièce, on dirige le côté d'une équerre dans le plan des deux fils, et

le plan vertical passant par le côté perpendiculaire indique la direction du trait de scie : la trace de la section est marquée sur l'arbre au moyen du fil à plomb.

Pour établir l'équarrissage, on trace dans la petite base un rectangle le plus grand possible en tenant compte de certaines conditions qui peuvent exclure une partie du bois; on tâche d'introduire dans ce rectangle le moins d'aubier possible; on en détermine le centre et on y fixe une règle parallèlement à l'un des côtés. (Remarquons en passant que les couches concentriques du cœur d'un arbre sont généralement circulaires, que par suite le plus grand rectangle inscrit dans la section sera généralement un carré (*abcd*)). Vers le centre de l'autre section on place une seconde règle et on la fait tourner autour du clou qui la fixe à l'axe jusqu'à ce qu'elle devienne parallèle à la première. Sa direction est celle du côté d'un rectangle égal au premier que l'on inscrit dans cette base. Soit (*abcd*) le rectangle inscrit dans la première (*fig.* 88); on prolonge les côtés verticaux jusqu'en (*m*) et (*n*) à la surface; on en fait autant à l'autre extrémité; on bat le cordeau entre *m* et *m'*, entre *n* et *n'*, et on a ainsi les traces des plans verticaux contenant les faces (*cd*) et (*bc*) sur la surface du tronc. Il faut avoir soin de nettoyer la surface de l'arbre sur laquelle on doit battre le cordeau et de le débarrasser de son écorce. Il faut aussi placer les côtés (*ad*) et (*bc*) verticalement au moyen du fil à plomb, et soulever le cordeau lui-même verticalement. Quand la pièce est très-longue, on place des clous sur l'alignement *mm'*, et l'on bat le cordeau entre deux clous successifs. Ce cordeau est imprégné d'une encre noire et laisse une marque très-nette sur l'écorce. On répète la même opération en (*p*) et (*o*) après le retournement de la pièce, et on procède à l'équarrissage qui se fait à la scie ou à la hache.

L'équarrissage à la scie permet d'utiliser les segments de bois appelés dosses que l'on enlève sur toute la longueur de l'arbre; mais il coûte plus de temps et de main-d'œuvre, aussi ne l'emploie-t-on que dans les environs des grandes villes où le bois est rare et où il faut en tirer le meilleur parti possible. La scie est manœuvrée (*fig.* 89 et 90) par trois ouvriers appelés scieurs de long; l'un est placé sur la pièce convenablement élevée, il donne la direction à la scie et la relève; deux autres placés sur le sol attaquent le bois en abaissant la scie. La scie mord alors le bois, non pas comme on pourrait le croire, *à priori*, suivant une droite, mais suivant une ligne courbe, de sorte que la scie, n'attaquant jamais le bois que sur une faible longueur, y pénètre facilement. Cette circonstance a empêché les premières scieries mécaniques établies de donner les résultats avantageux qu'on en attendait, car la scie y était dirigée verticalement.

On imagina de donner à la scie, à un moment donné, un mouvement de bascule, qui la met dans de meilleures conditions, ce qui a donné à la scierie mécanique les avantages ordinaires du travail mécanique sur celui des hommes. Au bout d'un certain temps, les deux parties de l'arbre se resserrent, et, en comprimant la scie, empêchent son mouvement; il suffit d'écarter ces deux parties par un coin pour éviter cet inconvénient.

Quand on équarrit à la hache, on commence par faire perpendiculairement à la longueur de la pièce des entailles atteignant en profondeur le plan de face qui doit rester après l'équarrissage, et l'ouvrier monté sur l'arbre s'assure avec un fil à plomb (*kg*) (*fig.* 91) que la ligne d'intersection des faces de l'entaille est une verticale s'appuyant sur la ligne tracée au cordeau; puis l'ouvrier, d'un coup de cognée, et par un tour de main où l'adresse fait plus que la force, fait sauter un éclat de bois d'une entaille à l'autre. Cette première opération laisse des surfaces assez brutes et irrégulières, on les polit un peu avec l'herminette ou

la doloire. On fait apparaître les deux autres faces latérales en donnant quartier à la pièce (*fig.* 92).

Il s'agit ensuite de ligner et contreligner la pièce, c'est-à-dire de faire apparaître sur les faces les projections de l'axe de la pièce.

On commence par tracer les lignes médianes de deux faces adjacentes; pour cela on place horizontalement la face sur laquelle on veut opérer; et on prend les milieux à chaque extrémité en observant la pollène, c'est-à-dire en prenant le milieu, non pas à partir des faces latérales, mais à partir de deux règles qui s'appuient sur ces faces latérales et qui font disparaître l'effet des inégalités de leurs plans; puis on bat le cordeau à la craie entre les milieux (*a*, *a*) ainsi déterminés (*fig.* 93). On trouve de même la médiane (*e*, *e*) de la face adjacente (*fig.* 94).

Il s'agit maintenant de faire passer par les deux droites ainsi déterminées deux plans rectangulaires qui détermineront l'axe, et de trouver les intersections de ces plans avec les deux faces opposées. Pour cela, sur la face horizontale qui est lignée, on dresse à la varlope un petit plan (*zy*, *zy*), appelé plumée, sur lequel on trace une perpendiculaire (*bd*) à (*aa*) au moyen de deux arcs de cercle décrits des points (*x*, *x*) de la ligne (*aa*). Puis on met la pièce de niveau et de devers, c'est-à-dire qu'on cherche à rendre horizontales deux droites rectangulaires tracées sur deux faces adjacentes de la pièce; ces deux droites rectangulaires sont (*ee*) et (*kb*); pour cela, on applique une règle le long de la ligne médiane (*ee*) tracée sur la face actuellement verticale, sur l'arête supérieure de cette règle on place un niveau de charpentier et l'on cale l'une des extrémités de la pièce jusqu'à ce que la règle et par suite la ligne (*ee*) soient horizontales; la pièce est alors de niveau. Pour la mettre de devers, c'est sur la ligne *kb* de la plumée qu'on appliquera le niveau et on opérera alors d'une manière analogue. Il ne s'agira plus alors que de mener une horizontale et une verticale par les extrémités de chaque ligne médiane. La verticale (*ai*) se mène au moyen du fil à plomb (*fig.* 95) et l'horizontale (*eo*) au moyen d'un compas en prenant $vo = se$, (*fig.* 96). On opère de même à l'autre bout de la pièce, et le lignage et contrelignage s'achèvent en battant le cordeau.

Tracé des assemblages. Épures d'exécution. Il reste à tailler les assemblages des diverses pièces de charpente. Lorsqu'il s'agit d'une ferme simple, on fait sur le sol l'épure linéaire de la charpente dans laquelle les pièces ne sont représentées que par leur ligne de voie. Cette épure linéaire, représentant les dimensions naturelles de la construction est ce qu'on appelle l'ételon ou étalon. On réunit les diverses épures nécessaires à l'exécution d'une charpente sur un seul ételon.

On monte alors, sur des chantiers, chacune des parties de la charpente, de niveau et de devers (comme nous l'avons fait pour le lignage des pièces), de manière que la projection de sa ligne de vole coïncide avec la ligne correspondante de l'épure. Pour cela une petite règle (*p*), *fig.* 97, étant placée suivant la ligne de la pièce de manière à la dépasser un peu, on promène contre elle et à son extrémité un fil à plomb C dont la pointe doit constamment rester sur la ligne (*mm*) de la projection linéaire. Une première pièce étant ainsi placée, on dispose la suivante au-dessus de sa ligne dans l'épure et l'on élève ainsi toutes les parties de la charpente, de façon que chaque pièce soit parfaitement de niveau et de devers.

On procède alors au piqué des bois, opération qui consiste à marquer sur chaque pièce B l'occupation de la pièce supérieure A en supposant qu'il n'y ait aucun assemblage. Soient par exemple A et B deux pièces devant s'assembler à tenon et mortaise : un ouvrier placera le fil à plomb F dans l'angle (*x*) et, l'écartant un

peu, le fera battre contre les deux pièces jusqu'à ce qu'il frappe exactement à l'angle qu'elles forment : on fera alors sur A, avec la pointe d'un compas, deux piqûres indiquant la trace du fil à plomb : deux piqûres seront pareillement faites sur la pièce B. On fera ensuite battre le fil à plomb dans l'angle (*z*) et on marquera encore quatre piqûres, et, les deux pièces A et B étant enlevées, on passera au piqué de celles qui sont au-dessous.

Un maître charpentier procède au relevé des piqûres, les réunit par des lignes droites et donne, par des marques connues, les indications nécessaires pour chaque assemblage : ce sera, par exemple, dans un assemblage à tenon et mortaise, la largeur et la profondeur du tenon et de la mortaise. Des chiffres inscrits sur les pièces qui doivent être assemblées montrent les points correspondants de celle-ci. Dans toute la France, le chiffrage adopté par les charpentiers est :

I, II, III, IV, V, V′, V″, V‴, VV, X, X′, X″, X‴. . . . . XX, XXX,

qui signifie

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13. . . . . 20, 30

Dans la plupart des charpentes peu compliquées, la simple mise sur lignes des pièces qui les composent, suivie du piqué, suffit parfaitement pour déterminer ce qui est nécessaire à la taille des pièces. Ces dessins linéaires ou ételons ne suffisent plus lorsque les pièces sont compliquées ; il faut une seconde épure sur laquelle sont tracés tous les détails de la pièce, et après avoir mis celle-ci sur ligne sur le tracé linéaire avec un fil à plomb, on relève les divers points, et, à partir des lignes milieux de la pièce, lignes que le lignage et le contrelignage ont déterminées, on porte des longueurs indiquées sur la seconde épure. Enfin, si l'assemblage est encore plus compliqué, on pratique la coupe sur trait; on ne se sert que d'une épure, et on relève les points à mesure qu'on taille les différents plans de la pièce.

Souvent une même pièce fait partie de plusieurs pans distinctifs; elle doit alors être mise sur la ligne avec chacun d'eux; il faut savoir la replacer toujours à la même distance dans le sens de sa longueur, et pour cela, on trace, perpendiculairement à celle-ci, un trait de ramènement, appelé trait ramèneret, répété sur l'ételon. » (Mannheim, *Cours de l'École polytechnique.*)

Paris. — Impr. Arnous de Rivière et C^e^, rue Racine, 26.

2

MANUEL

DE L'INGÉNIEUR

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES AU GRADE D'INGÉNIEUR

PAR

A. DEBAUVE

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

2me FASCICULE

AVEC 337 FIGURES ET 2 PLANCHES

—

Physique et chimie

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR

SUCCESSEUR DE VICTOR DALMONT

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

Quai des Augustins, 49

1872

Droits de traduction et de reproduction réservés

PHYSIQUE

—

TABLE DES MATIÈRES

—

CHAPITRE I

Objet de la physique 1
Propriétés générales des corps 2
Mesure de l'étendue (vernier) 3
Mesure du temps (pendule) 4
Mesure de la vitesse 4
De la pesanteur (fil à plomb) 5
Centre de gravité 6
Balances 7
Lois de la pesanteur 9
Densités des liquides et des solides . . . 11
Pèse-sels. Pèse-acides. Alcoomètres . . . 13
Élasticité et compressibilité 14

CHAPITRE II

Hydrostatique

Principe de Pascal 16
Presse hydraulique 17
Pressions sur les parois 17
Vases communiquants 19
Principe d'Archimède 20
Capillarité 21
Pression atmosphérique 23
Baromètres 25
Loi de Mariotte 28
Mélange des gaz 30
Mesure des hauteurs par le baromètre . . 30
Aérostats 32
Manomètres 35
Machine pneumatique 36
Machine de compression 38
Poids spécifiques des gaz 39

CHAPITRE III

De la chaleur

Température et thermomètres 41
Dilatation des corps 47
Pendule compensateur 49
Sources de chaleur 52
Chaleur rayonnante 53
Thermomètre différentiel de Nobili 54
Lois du rayonnement 55
Pouvoirs émissifs 55
Réflexion de la chaleur 56
Lois de Newton sur l'échauffement 57
Unité de chaleur. — Chaleurs spécifiques . . 57
Détermination des chaleurs spécifiques . . 58
Conductibilité 60
Fusion et solidification 61
Formation des vapeurs dans le vide . . . 62
Forces élastiques des vapeurs 64
Mélange des gaz et des vapeurs 65
Densité d'une vapeur 65
Ébullition 66
Marmite de Papin 67
Chaleur latente 67
Mélanges réfrigérants 67
Évaporation 68
Hygrométrie 68
Vents 70
Pluie. — Udomètre 73
Rosée 74
Température d'un lieu 74

CHAPITRE IV

Magnétisme, électricité, électro-magnétisme

Aimants naturels 76
Pôles. — Aiguille aimantée 77
Méthodes d'aimantation 79
Déclinaison 79
Inclinaison 80
Boussole marine 81
Électricité statique 81
Pendule électrique 82
Balance de torsion 83
Pouvoir des pointes 84
Électricité par influence 85
Machines électriques 85
Condensateur 87
Bouteille de Leyde 88

Étincelle électrique. — Ses effets. . . . 89
Électricité atmosphérique. 90
Paratonnerre. 92
Galvanisme. 93
Pile de Volta. 94
Différentes sortes de piles. 94
Effets des piles. 97
Galvanoplastie, dorure. 98
Expérience d'Œrsted. 99
Multiplicateur. — Galvanomètre. 99
Lois de l'intensité des courants. 100
Solénoïdes. 101
Induction. — Machine de Ruhmkorff. . . 102
Électro-aimants. 103
Télégraphes. 104

CHAPITRE V

Du son

Production du son. 107
Vitesse du son dans l'air. 109
— dans l'eau. 109
Propagation du son. 110
Intensité, hauteur, timbre. 110
Réflexion et interférences du son. 111

CHAPITRE VI

Optique

Des ombres. 112
Photométrie. 113
Réflexion de la lumière. 114
Miroirs plans. 115
Miroirs sphériques. 116
Réfraction de la lumière. 119
Mirage. 121
Prismes et lentilles. 122
Lentilles convergentes. 123
Lentilles divergentes. 125
Spectre solaire. 125
Achromatisme. 127
Lentilles achromatiques. 128
Étude des spectres de diverses origines. . 129
Interférences. 133
Besicles. 133
Loupe. — Microscope. 134
Lunette de Galilée. 135
Lunette astronomique. 136
Lunette terrestre. 137
Télescopes. 138
Appareils lenticulaires des phares. . . . 138
Théorie mécanique de la chaleur. 140

PHYSIQUE

PROGRAMME DES MATIÈRES

1. — Objet de la physique. — Propriétés générales des corps. — Mesure de l'étendue, du temps et de la vitesse. — Lois de la pesanteur. — Mesure des poids et des forces; balances; dynamomètres. — Poids spécifiques des solides et des liquides. — Élasticité et compressibilité des solides.

2. — Hydrostatique. — Pression des liquides. — Vases communiquants; presse hydraulique. — Principe d'Archimède; aréomètres. — Notions sur les phénomènes capillaires. — Pression des gaz. — Baromètres; mesure des hauteurs. — Loi de Mariotte. — Machine pneumatique et de compression; pompes. — Siphon. — Gazomètre. — Poids spécifiques des gaz.

3. — Chaleur. — Thermomètres. — Dilatation des solides, des liquides et des gaz. — Sources de chaleur. — Émission et propagation de la chaleur rayonnante. — Unité de chaleur; chaleurs spécifiques. — Conductibilité. — Réchauffement et refroidissement. — Changements d'état des corps. — Tension et densité des vapeurs. — Chaleur latente. — Notions élémentaires sur l'équivalent mécanique de la chaleur. — Évaporation — Hygrométrie. — Vents; anémomètre. — Pluie; udomètre.

4. Notions sur le magnétisme, l'électricité et l'électro-magnétisme. — Aimants naturels et artificiels. — Magnétisme terrestre. — Aiguille aimantée; boussole. — Machine électrique. — Electrophore. — Bouteille de Leyde. — Électricité atmosphérique; effets de la foudre; paratonnerre. — Pile voltaïque. — Effets physiques et chimiques des courants. — Action réciproque des courants et des aimants. — Multiplicateur. — Électro-aimants. — Principes de la télégraphie électrique.

5. — Notions sur la production et la propagation du son.

6. — Notions sur la production et la propagation de la lumière. — Photométrie. — Lois de la réflexion et de la réfraction simple; miroirs et lentilles. — Dispersion des couleurs; achromatisme. — Besicles, loupe, miscroscope. — Lunette de Galilée, lunette astronomique, lunette terrestre. — Principes des appareils lenticulaires des phares.

CHIMIE

PROGRAMME DES MATIÈRES

1. — Objet de la chimie. — Corps simples et composés. — Différents états des corps. — Force d'agrégation et de cohésion — Affinité chimique. — Lois des proportions multiples. — Équi-

valents. — Nomenclature chimique : acides, bases, sels. — Division des corps simples en métaux et en corps non métalliques ou métalloïdes.

2. — Métalloïdes. — Oxygène, hydrogène, azote, soufre, chlore, iode, phosphore, arsenic, carbone, bore, silicium. — État naturel, préparation, propriétés physiques, caractères distinctifs. — Usages industriels. — Air atmosphérique. — Principales combinaisons de l'oxygène et de l'hydrogène avec les autres métalloïdes, et de ces métalloïdes entre eux. — Qualités et essais des eaux. — Principes d'hydrotimétrie.

3. — Métaux. — Leur classification. — Métaux alcalins et terreux ; métaux usuels ; aluminium, manganèse, fer, chrome, zinc, étain, plomb, cuivre, mercure, argent, or, platine. — Etat naturel ; caractères distinctifs. — Usages industriels. — Notions sur la fabrication des fers, fontes et aciers. — Combinaisons des métaux entre eux et alliages utiles à l'industrie. — Action de l'oxygène sur les métaux. — Sels neutres, acides, basiques. — Cristallisation, fusion, solubilité des sels. — Caractères distinctifs des sels, d'après leurs acides et d'après leurs bases.

4. — Chimie organique. — Nature des substances organiques. — Principes constituants des matières végétales et animales. — Applications à l'agriculture. — Fermentation alcoolique — Corps gras. — Saponification. — Huiles siccatives et non siccatives.

CHIMIE

—

TABLE DES MATIÈRES

—

CHAPITRE I

Objet de la chimie. 145
Corps simples et composés. 146
Affinité chimique. 146
Cristallisation. 147
Des proportions multiples. — Équivalents. 148
Nomenclature chimique. 150
Métaux et métalloïdes. 152

CHAPITRE II

Métalloïdes

Oxygène. 154
Hydrogène. 157
Chalumeau à gaz oxygène et hydrogène . . 159
Azote. 159
Soufre. 160
Chlore. 162
Brome. — Iode. 164
Fluor. 165
Phosphore. 165
Arsenic. 167
Carbone. 168
Diamant, graphite, anthracite. 169
Noir de fumée. 169
Charbon de bois. 169
Noir animal 171
Bore. 171
Silicium. 172
Air atmosphérique. 172
Dosage de l'air en volume. 173
id. en poids. 174
De la combustion. 175
Protoxyde d'azote. 177
Bioxyde d'azote. 177
Acides azoteux, hypoazotique. 178
Acide azotique. 178
Acides hyposulfureux, sulfureux. 180
Acide sulfurique. 181
Acide hypochloreux. 184
Acides chloreux, hypochlorique, chlorique, perchlorique. 185
Acides hypophosphoreux, phosphoreux, phosphorique. 185
Oxyde de carbone. 187
Acide carbonique. 188
Acides borique et silicique. 190
Eau. 191
Composition de l'eau. 192
Eau des sources et rivières. 193
Hydrotimétrie. 197
Purification des eaux. 198
Ammoniaque. 198
Sels ammoniacaux. 200
Acide sulfhydrique. 201
Acide chlorhydrique. 202
Hydrogène protocarboné (gaz des marais). 204
— bicarboné (grisou). 205
Gaz d'éclairage. 206
Sulfure de carbone. 207
Cyanogène. 208

CHAPITRE III

Métaux

Classification des métaux. 209
Potassium. — Sodium. — Potasse. — Soude. 210
Carbonates de potasse et de soude. . . . 211
Nitre ou salpêtre. 213
Poudre à canon. 214
Sel marin. 214
Silicates de potasse et de soude. 215
Verres. 216
Cristal. 217
Baryte. — Strontiane 218
Chaux. 219
Chlorure de chaux. 219
Magnésie. 220
Alumine. 220
Aluns. 221
Argiles et poteries. 221
Manganèse. 223
Fer et ses oxydes. 223
Chrome, nickel, cobalt. 224

Zinc. 224
Oxyde de zinc et sels de zinc. 225
Métallurgie du zinc. 225
Étain. 225
Métallurgie de l'étain. 227
Antimoine. 227
Bismuth. 228
Plomb, oxydes et sels de plomb. 228
Céruse. 229
Métallurgie du plomb. 230
Cuivre. 231
Oxydes et sels de cuivre. 232
Métallurgie du cuivre. 233
Mercure, oxydes et sels. 235
Métallurgie du mercure. 236
Argent, oxydes et sels. 237
Essai des alliages d'argent. 238
Photographie. 239
Métallurgie de l'argent. 239
Or. 239
Sels d'or. — Métallurgie de l'or. 240
Platine. 240
Traitement des minerais. 241
Théorie de la métallurgie du fer. 242
Forge catalane. 242
Hauts fourneaux. 243
De la fonte. 244
Affinage de la fonte au petit foyer. . . . 245
Mazéage et puddlage. 246
De l'acier. 246
De la trempe. 247
Constitution des fers, fontes et aciers. . . 248
Procédé Bessemer. 249
Procédé Heaton. 250
Alliages des métaux. 251
Caractères d'imprimerie, soudures, laiton. 251
Bronze. 252
Étamage. 252
Action de l'oxygène sur les métaux. . . . 253
Des sels. — Lois de leur composition. . . 253
Solubilité des sels. 254
Sels neutres, acides et basiques. 255
Lois de Berthollet. 256
Reconnaître l'acide d'un sel. 257
— la base d'un sel. 257

CHAPITRE IV

Chimie organique

Principes des matières organiques. 259
Constitution d'un végétal. 259
Action des métalloïdes sur les corps organiques. 260
Applications à l'agriculture. — Engrais. . 261
Fermentation alcoolique. 262
Vin. — Alcool. 264
Éther. 266
Des alcools et des éthers en général. . . 267
Acide acétique. — Vinaigre. 267
Corps gras. — Saponification. 268
Fabrication des huiles et bougies. 269
Fabrication des savons. 270
Huiles siccatives et non siccatives. 271
Huiles essentielles. 272

PHYSIQUE

CHAPITRE PREMIER

OBJET DE LA PHYSIQUE

Propriétés générales des corps. — Mesure de l'étendue, du temps et de la vitesse. — Loi de la pesanteur. — Mesure des poids et des forces ; balances ; dynamomètres. — Poids spécifiques des solides et des liquides. — Élasticité et compressibilité des solides.

Objet de la physique. — Les sciences qui concourent à définir un corps sont nombreuses : la géométrie nous permet de calculer les dimensions de ce corps, sa surface et son volume ; si nous ajoutons aux trois coordonnées de la géométrie une quatrième coordonnée, le temps, nous pouvons calculer les positions successives du corps considéré dans l'espace, et c'est la mécanique qui nous permet d'y arriver. Voulons-nous connaître l'endroit où l'on rencontre un corps et la manière dont la nature l'a produit, voulons-nous connaître sa forme, sa couleur et pour ainsi dire sa charpente interne, la géologie et la minéralogie nous offrent de précieux renseignements.

Ce n'est pas tout, si nous nous demandons de quels éléments une substance est formée, ce qu'elle produira si on la met en contact intime avec telle ou telle autre substance, il nous faut recourir à la chimie. Enfin la physique nous enseigne comment le corps considéré se comporte sous l'action des forces, ou des éléments naturels, comment il tombe, comment il se dissout dans l'eau, comment la chaleur, l'électricité ou la lumière le modifient. C'est grâce à ce faisceau de sciences que l'on arrive à la connaissance parfaite des corps de la nature ou de ceux que le génie de l'homme a découverts.

Les faits ou phénomènes de la physique sont donc ceux qui sont dus à l'action des agents naturels : un corps étant placé dans certaines conditions, que ces conditions viennent à changer, il subit lui-même des modifications ; il était soutenu, on enlève l'appui et il tombe ; on change sa température, il change de volume ou d'état, de solide devient liquide, de liquide gazeux. Ce sont là des phénomènes qui se produisent : mais ils possèdent un caractère constant, c'est de ne point altérer la structure du corps, et, si on vient à le replacer dans les conditions initiales, il reprendra sa forme et ses propriétés initiales.

Au contraire, les phénomènes chimiques sont permanents : le zinc, le plomb chauffés à l'air brûlent ou s'oxydent et se changent en poussière qui, abandonnée

à elle-même dans les conditions où se trouvait le métal, ne redevient ni zinc ni plomb : c'est que ces métaux ont absorbé un élément de l'air, l'oxygène, et qu'ils ont éprouvé une modification permanente ; ils ne sont plus ce qu'ils étaient. Cette permanence des phénomènes différencie la chimie de la physique, bien que, par plus d'un côté, ces deux sciences soient voisines ; et même, elles se confondent presque toujours ; leurs phénomènes sont bien souvent coexistants et l'on ne saurait en séparer l'étude.

Propriétés générales des corps. — La nature est inerte, c'est-à-dire qu'elle ne saurait changer par elle-même ses conditions d'existence. Pour la modifier, il faut une action extérieure. Ainsi la matière ne se meut que si elle y est sollicitée par un effort extérieur, par ce que l'on appelle une force.

Un autre fait, admis de tous, est que la matière est divisible à l'infini : en effet, on conçoit qu'une substance étant réduite en poudre fine on peut encore diviser chaque grain en deux ou plusieurs parties. Toutefois l'esprit répugne à concevoir une divisibilité infinie, et de tous temps les savants ont admis l'existence des atomes (atomes crochus des anciens) ; les combinaisons chimiques s'expliquent facilement en supposant les corps formés en dernière analyse de parties très-petites appelées atomes. Cette hypothèse est commode et nous l'adopterons, d'autant plus qu'elle explique assez bien les deux propriétés suivantes : la porosité et la compressibilité.

On sait que certains corps d'aspect compacte livrent cependant passage à des liquides, ainsi la peau de chamois sert à filtrer le mercure. Cette propriété de livrer passage aux liquides, connue sous le nom de porosité, existe dans tous les corps ; les métaux les plus durs, le fer par exemple, la possèdent ; en effet, prenez un tuyau de fonte hermétiquement fermé et rempli d'eau, soumettez cette eau à une forte pression, vous la verrez suinter à la paroi extérieure du métal. Comme conséquence de la porosité, nous citerons la compressibilité de la matière : vous n'ignorez pas que le caoutchouc par exemple est compressible et par suite extensible, qu'on peut en augmenter ou en réduire le volume : mais cette propriété se rencontre plus ou moins accentuée chez tous les corps de la nature, l'expérience directe la démontre chez les métaux les plus durs.

La matière est élastique, c'est-à-dire que, comprimée, elle revient à son état primitif, la compression cessant, pourvu que l'on n'ait pas dépassé une certaine limite indiquée par l'expérience.

Ce qui précède nous apprend que les corps sont discontinus à l'intérieur, qu'il y existe des espaces vides ; il nous faut donc admettre qu'ils sont formés de parties élémentaires séparées les unes des autres, de molécules, et ces molécules sont rapprochées par la force naturelle ou attraction qu'on appelle cohésion. Je m'empresse de faire remarquer au lecteur que cette hypothèse n'est, en somme, qu'une manière de parler, elle est un reste de cette vieille science bafouée par Molière et qui disait : « L'opium fait dormir parce qu'il y a en lui une certaine vertu dormitive. » La cohésion explique la chose par le mot lui-même, c'est une expression commode et voilà tout.

Les corps sont donc formés de molécules séparées entre elles : il ne faudrait pas confondre la molécule avec les infiniment petits considérés en analyse. La molécule présente l'impénétrabilité de la matière, c'est-à-dire que deux molécules ne peuvent coexister à la fois en un point de l'espace.

Sous l'influence de la chaleur les corps changent d'état : chauffez un solide, il devient liquide ; chauffez un liquide, il devient gazeux. Par le refroidissement on revient inversement du gazeux au solide ; les exceptions à cette règle n'existe-

raient certainement pas, si nous disposions de sources de chaleur ou de froid assez puissantes.

Or, dans un solide, la cohésion se fait sentir à chaque instant ; les molécules restent toujours rapprochées, à moins que quelque cause extérieure ne vienne les séparer et cette cause extérieure doit être d'autant plus énergique en général que le corps est plus éloigné de devenir liquide ; dans un liquide, la cohésion est nulle, les molécules s'associent et se dissocient sans effort, le corps prend toute forme que l'on veut et épouse toujours celle du vase où on le renferme ; dans un gaz, au contraire, la cohésion est pour ainsi dire négative, les molécules semblent se repousser, le gaz se répand dans tout l'intérieur du vaisseau où on le renferme, quelque grand qu'il soit. Nous avons vu que la chaleur rendait liquides les solides et gazeux les liquides : c'est donc l'ennemie de la cohésion et ces deux puissances sont en lutte perpétuelle. Si la cohésion l'emporte, nous avons un solide ; si la cohésion et la chaleur se font équilibre, nous avons un liquide ; si la chaleur l'emporte, nous avons un gaz. Les liquides et les gaz possèdent certaines propriétés communes : on les réunit sous le nom de fluides.

Mesure de l'étendue, du temps et de la vitesse. — On écrit quelquefois : l'étendue est une propriété des corps d'occuper dans l'espace une certaine place de dimensions fixées ; le temps est la durée d'un phénomène. Ces définitions rentrent dans la catégorie de celle de l'opium, elles expliquent la chose par le mot. L'étendue, le temps sont des notions premières, familières à l'esprit de chacun, que l'on embrouille à vouloir les expliquer ; les plus grands savants du monde ne sauraient nous dire clairement ce que c'est, et cependant nous le savons tous.

La mesure de l'étendue est le mètre, la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre : nous ne dirons point comment on mesure les longueurs. Nous nous arrêterons seulement au cas où l'on veut le faire avec une grande approximation : on recourt alors à l'emploi du vernier, petit appareil qui porte le nom de son inventeur :

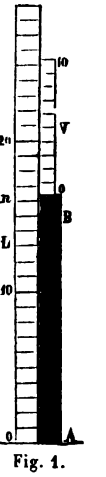


Fig. 1.

Nous avons un objet AB à mesurer, et l'extrémité B de cet objet tombe entre la n^{me} et la $(n+1)$ division, il peut être difficile d'apprécier à l'œil la distance Bn. Imaginons que nous prenions K divisions de la grande règle et que nous divisions la longueur, donnée par ces K divisions, en K + 1 parties, nous aurons une petite règle qui sera le vernier V. Pour s'en servir, on le place à la suite de l'objet AB, et l'on cherche quelle est la division du vernier qui coïncide avec la division de la règle, si c'est la m^{me}, on aura la longueur AB en ajoutant au n° de la division de la règle qui précède B la fraction $\frac{m}{k}$. Pour le démontrer, supposons la grande règle divisée en millimètres, prenons 9 millimètres, et divisons cette longueur en dix parties ; nous aurons le vernier dont une division différera d'une division de la règle de $\frac{1}{10}$ de millimètre. Si maintenant l'extrémité B de l'objet était à $\frac{4}{10}$ de millimètres de la division n de la règle, le premier trait du vernier ne sera plus qu'à $\frac{3}{10}$ de millimètre de la division $n+1$ de la règle, le deuxième trait du vernier ne sera plus qu'à $\frac{2}{10}$ de millimètre du trait $n+2$ de la règle, le quatrième trait du vernier coïncidera avec le trait $n+4$ de la règle. La marche à suivre indiquée plus haut est donc vraie. Il n'arrive pour ainsi dire jamais qu'un trait du vernier soit en coïncidence absolue avec un trait de la règle, mais on distingue bien avec une loupe quels sont les traits les plus voisins.

L'emploi du vernier ne laisse point que d'être assez limité, vu la difficulté de faire une graduation formée de très-petites divisions.

Mesure du temps. — Il est facile de trouver dans la nature des exemples de temps égaux. Un corps qui tombe plusieurs fois dans des conditions identiques met toujours le même temps à tomber. C'est sur ce principe que les anciens avaient fondé le sablier; plus tard vinrent les clepsydres, appareils analogues au sablier, mais dont la précision était rendue plus parfaite par la substitution de l'eau au sable. L'inconvénient de ces appareils saute aux yeux.

L'unité de temps adoptée aujourd'hui est le jour solaire moyen. L'intervalle qui sépare deux passages consécutifs du soleil au méridien du lieu est un jour solaire : or, suivant les saisons de l'année, le jour solaire est variable de quelques minutes en plus ou en moins. On a pris comme unité le jour solaire moyen qui se divise en 24 heures de 60 minutes, la minute est de 60 secondes. Le jour comprend donc 86,400 secondes. Rappelons-nous que la seconde est l'unité de temps adoptée dans tous les calculs de physique et de mécanique, et, que, dans une formule quelconque, t représente un nombre de secondes.

Galilée, considérant dans une église de Pise le balancement d'un lustre, vit que les oscillations en étaient isochrones ou d'égale durée. L'expérience et le calcul montrent en effet que les petites oscillations du pendule sont isochrones ; voilà donc tout trouvé un moyen simple de mesurer le temps ; nos horloges ont pour pièce principale le pendule. Mais, si perfectionnée que soit la suspension du pendule, il est pratiquement impossible de supprimer tout frottement, et, pour entretenir les oscillations, il est utile de lui communiquer à chaque instant une légère impulsion ; c'est l'ancre que l'on charge de ce soin, et l'ancre est lui-même actionné par une roue dentée qu'il arrête à chaque instant bien qu'elle soit sollicitée à se mouvoir et à tourner sans cesse, soit par un poids, soit par un ressort. A chaque oscillation, l'ancre, sorte de compas à branches courbes très-ouvertes, laisse échapper une dent de cette roue dentée dont nous venons de parler, et l'axe de cette roue porte une aiguille qui marque les secondes. Un système de pignons ou petites roues et de grandes roues dentées transmet le mouvement de l'axe des secondes à l'axe des minutes et à l'axe des heures en le diminuant dans les rapports de $\frac{1}{60}$, puis de $\frac{1}{12}$.

Avant de quitter la théorie du pendule, nous dirons que la durée de l'oscillation d'un pendule de longueur l est donné par la formule $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, dans laquelle ($g$) représente ce qu'on appelle l'accélération de la pesanteur (nous la définirons plus loin), $g = 9^m,8088$. Le temps t est exprimé en secondes, l et g en mètres. Si nous voulons avoir la longueur du pendule simple qui bat la seconde, il suffit de faire dans la formule $t = 1$ et l'on a $l = \frac{g}{\pi^2} = 0^m,993855$. Nous aurons lieu de revenir en mécanique sur la théorie du pendule. Nous dirons seulement que ce qu'on appelle le pendule simple est une pure conception théorique : il se compose d'un point matériel qui oscille autour d'un point fixe dont il se tient à distance constante. En pratique, le point matériel n'existe pas, il faut au moins une petite boule : le lien théorique n'existe pas non plus, il faut au moins un fil, et l'on a toujours affaire a un pendule composé. On appelle pendule simple, synchrone d'un pendule composé, le pendule simple qui accomplirait son oscillation dans le même temps que le pendule composé : en calcul, c'est toujours le pendule simple que l'on considère.

Mesure de la vitesse. — Lorsqu'un corps se déplace de longueurs égales en emps égaux, on dit qu'il possède un mouvement uniforme, et la vitesse de ce

mouvement est le rapport de l'espace parcouru au temps qu'il a fallu pour le parcourir, ce qui revient à dire que c'est l'espace parcouru dans l'unité de temps. Mais le mouvement uniforme est l'exception dans la nature; le mouvement est généralement varié, et l'on appelle vitesse à un moment donné, le rapport de l'espace infiniment petit, parcouru aux environs du moment considéré, au temps élémentaire qu'il a fallu pour le parcourir. On suppose, ce qui se conçoit bien, que le mobile possède un mouvement uniforme pendant un temps infiniment court. En particulier, si l'espace parcouru est fonction algébrique du temps, $e = f(t)$, on aura $V = \frac{de}{dt}$. Ces notions s'éclairciront en mécanique — pour le moment, elles suffisent.

De la pesanteur. — Un corps abandonné à lui-même tombe en suivant une direction fixe en chaque point, direction déterminée par le fil à plomb. Les exceptions à cette règle, telles que les aérostats, ne sont qu'apparentes, et nous verrons plus tard que les ballons sont comme tout autre corps soumis aux effets de la pesanteur. La pesanteur est la force qui fait tomber les corps: telle est la définition. Mais la pesanteur n'est qu'un cas particulier d'un fait plus général: l'attraction qui s'exerce entre deux points matériels quelconques, en quelque endroit qu'ils se trouvent. Nous devons prémunir dès à présent le lecteur contre une confusion fréquente: il ne faut pas croire que deux molécules s'attirent réellement suivant des lois dont nous parlerons en mécanique, il faut dire seulement que les choses se passent comme s'il y avait attraction entre deux points matériels: l'attraction n'est qu'une conception théorique, commode pour expliquer les choses.

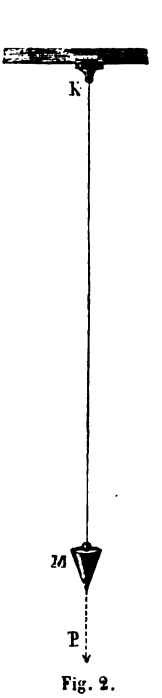


Fig. 2.

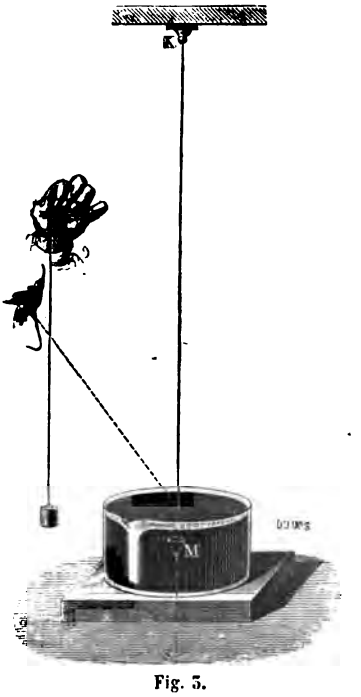


Fig. 3.

Revenons à la pesanteur; elle a en chaque point du globe une direction fixe, celle du fil à plomb, et cette direction est normale au sphéroïde terrestre. En effet, la surface du sphéroïde coïncide avec celle des eaux tranquilles (ainsi qu'on peut le vérifier en observant la convexité de la mer): Si nous disposons un fil à plomb au-dessus d'une surface liquide, de mercure par exemple, nous voyons dans ce miroir l'image du fil dans le prolongement du fil lui-même, et cela dans toutes les directions. Nous verrons en optique que, pour qu'il en soit ainsi, il faut que le fil à plomb fasse dans toutes ces directions le même angle avec la surface, donc il est normal à la surface. Vu les dimensions restreintes du vase, la surface liquide coïncide avec le plan tangent au sphéroïde terrestre. La direction du fil à plomb est la verticale du lieu. Les verticales varient d'un lieu à l'autre. Si la terre était sphérique, elles

concourraient toutes au centre de la sphère, mais la terre est un globe aplati aux pôles, et les verticales ne se rencontrent point en réalité, bien que souvent on le suppose dans le calcul ; cette hypothèse du reste n'altère guère la vérité.

Poids. — L'effet de la pesanteur varie avec la quantité de matière que renferme un corps ; à volume égal, l'expérience nous apprend que des corps exigent pour être soutenus un effort plus ou moins grand suivant que les particules y sont plus ou moins condensées. Cet effort variable qu'il faut faire pour soutenir un corps est le poids. Le poids est proportionnel au volume pour une même substance : il varie d'une substance à l'autre suivant la densité (la densité est le rapport du poids d'un corps à son volume). — Il est facile de concevoir deux poids égaux, ce sont ceux qui exigent le même effort peur être soutenus dans l'espace : deux poids égaux constituent un poids double, et l'on arrive de proche en proche à la notion de poids dans un rapport quelconque.

Mesure des poids et des forces. — Pour comparer les poids entre eux, il faut une unité : c'est le poids d'un décimètre cube d'eau pure à 4° centigrades, c'est le kilogramme. Dire qu'un corps pèse quatre kilogrammes, c'est dire qu'il faut pour le soutenir le même effort que pour soutenir quatre décimètres cubes d'eau pure à 4°.

Nous savons par expérience que, pour mettre un corps en mouvement dans une direction quelconque, il faut un effort musculaire plus ou moins grand ; ces efforts, qu'ils soient produits par l'homme, les animaux ou les agents naturels, sont des forces. Les forces sont la généralisation du poids : il est clair qu'on peut les mesurer l'un par l'autre : on imagine très-bien un poids égal à la force qu'il faut pour traîner une voiture. Nous prendrons donc comme unité de force le kilogramme. Pour mesurer les forces, on se sert de dynamomètres ; ils sont le plus ordinairement construits d'après le principe suivant : on a deux lames d'acier réunies par leurs extrémités, on applique en leur milieu une force, ces lames s'écartent et aux écartements correspondent des efforts ou poids déterminés que l'on a trouvés par l'expérience. Nous reviendrons sur les dynanomètres.

Centre de gravité. Équilibre. — Le centre de gravité d'un corps est le point d'application de la résultante des actions de la pesanteur. La pesanteur produit sur chaque molécule une action dirigée suivant la verticale : pour un même corps, les verticales peuvent être considérées comme absolument parallèles : on a donc une série de petites forces parallèles, que la mécanique nous apprendra à com-

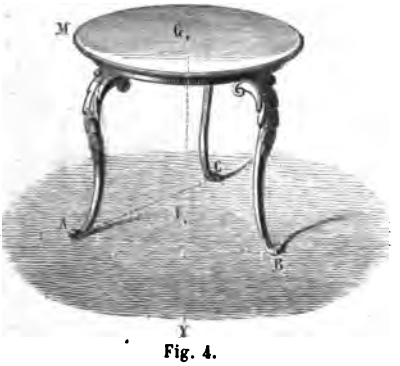


Fig. 4.

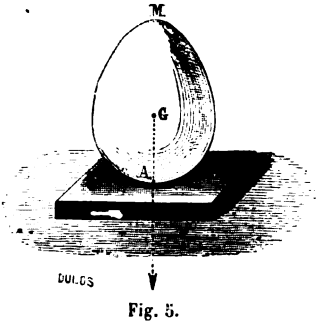


Fig. 5.

poser en une force unique ou résultante appliquée en un point fixe du corps, appelé centre de gravité.

On dit qu'un corps est en équilibre, lorsqu'il reste immobile bien que sollicité par des forces extérieures ; c'est qu'alors ces forces sont telles, qu'elles s'annulent réciproquement. Or, l'action de la pesanteur se réduisant à une force unique appliquée au centre de gravité, il faut que toutes les autres actions se réduisent à une force égale et de sens contraire. Un corps ne peut donc être en équilibre que si le centre de gravité en est soutenu, et nous distinguerons trois cas d'équilibre : 1° il y a équilibre stable, lorsque la verticale, passant par le centre de gravité G, tombe en un point I situé à l'intérieur du polygone de sustentation, et, en effet, l'objet dérangé de sa position d'équilibre d'une petite quantité tend à y revenir immédiatement (*fig.* 4).

2° Il y a équilibre indifférent, lorsque le point d'attache coïncide avec le centre de gravité : dans ce cas, l'objet écarté de sa position ne tend pas y revenir, il conserve la seconde position qui correspond à un nouvel équilibre ; c'est, par exemple le cas d'une sphère qui tourne autour d'un de ses diamètres pris comme axe.

3° Il y a équilibre instable, lorsque le corps écarté de sa position d'équilibre tend à s'en éloigner le plus possible : c'est le cas d'un œuf qui serait placé sur un de ses bouts (*fig.* 5).

Balances. — La balance se compose essentiellement d'une barre ou fléau inflexible suspendu par un axe horizontal et aux extrémités duquel on attache des poids que l'on veut comparer.

Étudions l'équilibre d'un fléau à deux branches égales. Le fléau étant symétri-

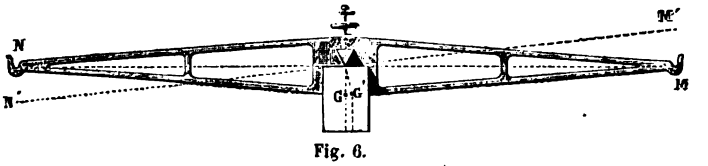


Fig. 6.

que porte à son centre un prisme ou couteau saillant A, fait en acier trempé et reposant sur une surface lisse et dure, telle que de l'agate ou de l'acier. L'axe de suspension est l'horizontale qui passe en A.

1° Si le centre de gravité G est audessous de l'axe de suspension, et qu'on amène le fléau de MN en M'N', le centre de gravité viendra de G en G', en décrivant l'angle GAG' = MAM', et l'on voit que la résultante de la pesanteur appliquée en G' tend à ramener le fléau à sa position initiale, et, en effet, il y reviendra par une série d'oscillations plus ou moins prolongée.

2° Si le centre de gravité G se confond avec A, il y a équilibre indifférent, et le fléau restera dans la position M'N' où on l'aura amené.

3° Si le centre de gravité vient en *g* au-dessus de A, et qu'on écarte le fléau de la position MN, la pesanteur tendra à l'en éloigner indéfiniment : l'équilibre est instable.

Dans une balance, c'est la première position que l'on adopte, et le calcul suivant nous indiquera ce qui se passe lorsqu'on fait une pesée : Soit p_1 le poids du fléau, P deux poids égaux placés à chaque extrémité du fléau, et p une surcharge à l'extrémité de droite ; il est clair que le bras droit du fléau va s'incliner par l'effet de cette surcharge, et nous avons un système dont il faut chercher l'équilibre. Supposons connue la théorie mécanique du levier, elle nous apprend que : deux forces parallèles F et F' étant appliquées en P et Q d'une droite rigide PQ, ces deux forces peuvent se remplacer par une autre, leur résultante, appliquée en un point M de la droite rigide, tel que $\frac{MP}{MQ} = \frac{F'}{F}$, c'est-à-dire que le rap-

port des distances est dans le rapport inverse des forces correspondantes.

D'après cela, les poids P appliqués en m'_1 et m_1 ont leur résultante 2P au milieu A de $m_1 m'_1$, c'est-à-dire sur l'arête du couteau ; cette résultante est détruite par

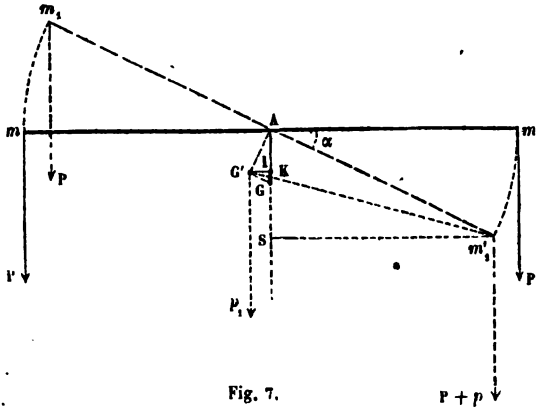


Fig. 7.

l'appui ; reste le poids p_1 du fléau appliqué en G' et la surcharge p appliquée en m_1'. Ces deux forces parallèles ont une résultante comprise entre elles deux, appliquée en un point K de $G'm'_1$ tel que $\frac{KG'}{Km'_1} = \frac{p}{p_1}$. Si nous admettons que $m_1 m_1'$ soit la position d'équilibre, c'est que la résultante précédente qui est verticale passe par l'arête A du couteau. Ceci posé, on aura $\frac{p}{p_1} = \frac{KG'}{Km'_1} = \frac{IG'}{Sm'_1} = \frac{AG' \sin G'AK}{Am'_1 \sin SAm'_1}$; ou bien en appelant α l'angle d'inclinaison du fléau, d la distance GA du centre de gravité à l'axe de suspension, l la demi-longueur du fléau,

$$\frac{p}{p_1} = \frac{d \sin \alpha}{l \cos \alpha} \qquad \text{Tang } \alpha = \frac{pl}{p_1 d}.$$

Ce résultat nous apprend que tang α sera nul pour $p = o$: ainsi, lorsque les poids placés dans chaque plateau de la balance sont égaux, le fléau reste horizontal, et réciproquement. L'horizontalité du fléau est accusée par une longue aiguille mobile sur un cadran.

Sensibilité d'une balance. — La sensibilité d'une balance est mesurée par l'inclinaison α qu'elle prend pour une surcharge donnée, p, un milligramme par exemple (les balances de précision sont seules sensibles au milligramme). La formule nous montre que la sensibilité augmente avec la longueur du fléau et avec sa légèreté ; elle augmente aussi quand le centre de gravité se rapproche de l'axe de suspension, mais il ne faut pas aller trop loin dans cette voie, car tang α devient ∞ pour $d = o$, et si le centre de gravité est trop près du couteau, les oscillations du fléau sont interminables. L'emploi de l'aluminium, métal léger quoique résistant, est très-précieux pour les balances de précision.

Méthode des doubles pesées de Borda. — Nous ne dirons point comment on fait une pesée simple, mais nous expliquerons la méthode des doubles pesées, seule employée dans les dosages chimiques, car elle permet d'arriver à de bons résultats avec un appareil médiocre. Dans un plateau on met le corps, dans l'autre, de la grenaille de plomb et des objets plus légers, de manière à rendre le

fléau horizontal; puis on enlève le corps, et on le remplace par une série de poids gradués jusqu'à ce que l'horizontalité du fléau soit rétablie. La somme des poids gradués donne le poids du corps.

Dans la théorie du levier, nous dirons quelques mots de la balance dite romaine, de la bascule, etc.

Lois de la pesanteur. — Jusqu'à présent, nous n'avons considéré que les effets de la pesanteur sur les corps immobiles, passons à l'étude de la pesanteur dans le mouvement.

Fig. 8.

I. Tous les corps tombent avec la même vitesse; à l'air libre, il n'en est rien : une balle de plomb arrive plus vite au sol qu'une feuille de papier. C'est qu'en effet, il y a là une circonstance étrangère à la pesanteur : la résistance de l'air; cette résistance agit sur chacune des molécules, et d'après cela retarde d'autant plus la chute d'un corps, que ce corps est moins condensé, c'est-à-dire qu'il renferme moins de matière sous un volume donné. Dans les calculs, on admet la résistance de l'air proportionnelle au carré de la vitesse du corps. Dans le vide, cette influence externe disparaît : faisons le vide dans un long tube, où par avance on a placé une balle de plomb, un chiffon et une plume, puis retournons le tube, nous verrons les trois objets tomber de compagnie.

II. Il suffit donc, pour étudier les diverses phases de la chute d'un corps, de prendre une substance quelconque; la difficulté est qu'il faut opérer à l'air. Galilée la tourna, en réduisant considérablement la vitesse du mobile : il se servait d'un petit chariot, formé de deux poulies à gorge réunies entre elles, et à la traverse qui les réunissait était suspendue une balle de plomb : la gorge des poulies reposait sur une corde peu inclinée, et le lest en plomb maintenait tout l'appareil en équilibre stable. Vu la faible inclinaison de la corde, la vitesse était faible, on pouvait suivre la marche et voir l'espace parcouru par seconde. Le système revenait, en somme, à réduire la pesanteur dans un rapport constant, et les lois n'étaient pas altérées. Il trouva de la sorte que les espaces parcourus étaient proportionnels aux carrés des temps, ce qui se résume dans la formule $e = \frac{gt^2}{2}$, qui donne, pour la vitesse du mobile, à un moment donné, $v = \frac{de}{dt} = gt$.

Nous avons donc affaire à un mouvement uniformément accéléré, c'est-à-dire tel, que la vitesse s'accroît de quantités égales dans des temps égaux. Ici l'accroissement constant est la quantité g que nous avons calculée déjà, et que l'on appelle l'accélération de la pesanteur. Remarquons, en passant, que l'accélération dans le mouvement uniformément varié étant l'accroissement de la vitesse pendant l'unité de temps, la notion de l'accélération dans un mouvement quelconque deviendra comme la vitesse une notion infinitésimale; l'accélération sera la dérivée $\frac{dv}{dt}$ de la vitesse par rapport au temps. Dans l'espèce, $\frac{dv}{dt} = g$.

Appareil du général Morin. — Si on laisse tomber librement d'une petite hauteur un poids considérable, quoique de faible volume, la vitesse n'aura pas le temps de s'accélérer beaucoup; la vitesse étant petite, par rapport au poids, la

résistance de l'air sera négligeable. Tel est le principe de l'appareil du général Morin. Il se compose d'un cylindre en bois M, pouvant tourner autour de son axe, grâce à une vis sans fin R, qui est mue par une roue dentée, actionnée elle-même par un poids d'horloge P'. La roue dentée engrène du côté opposé à la vis

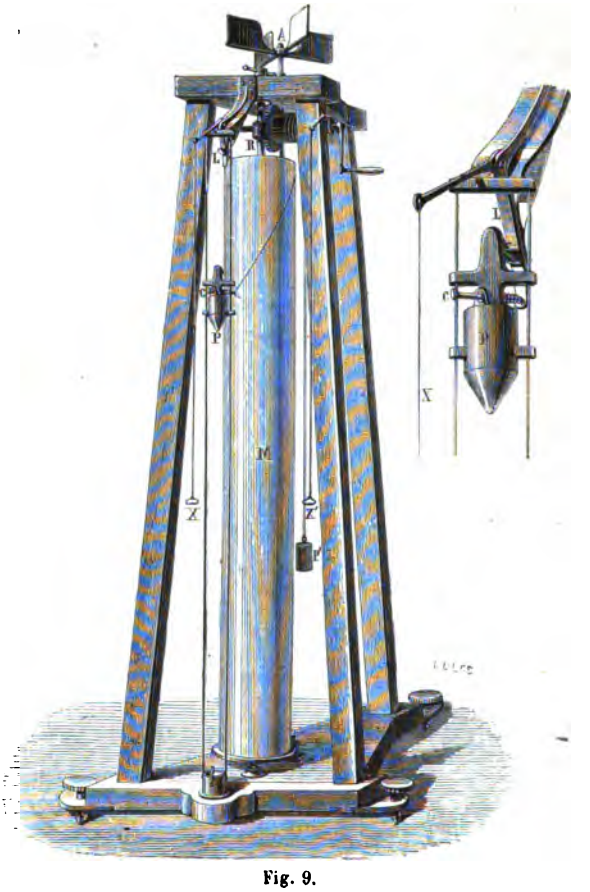


Fig. 9.

R avec une autre vis sans fin, dont l'axe porte les ailettes A. Si le poids P' est abandonné à lui-même, il tend à prendre un mouvement accéléré, et à le communiquer au cylindre en bois; mais les ailettes sont là, qui subissent de la part de l'air une résistance très-rapidement croissante avec la vitesse, résistance que l'on peut admettre proportionnelle au carré de la vitesse. Le poids P' est ralenti, et un mouvement uniforme s'établit au bout de quelques instants. (Disons en passant que le moulin à ailettes est employé dans les horloges et pendules pour régulariser la sonnerie, et empêcher que les coups du marteau ne se précipitent d'une manière gênante.)

Sur le cylindre M est appliquée une feuille de papier blanc, que vient frôler la pointe d'un crayon tendre fixé au poids P, dont nous voulons étudier la chute.

Lorsque le cylindre M a pris un mouvement uniforme, un petit mécanisme permet de lâcher le poids P, qui glisse entre deux fils verticaux, où le guident des

oreilles latérales. Le crayon marque sur le papier une courbe, qui est à la combinaison du mouvement du poids avec le mouvement du cylindre. Le cylindre est une surface développable, nous pouvons donc couper la feuille de papier suivant une génératrice, et l'étaler sur un plan. Nous aurons la courbe ci-contre :

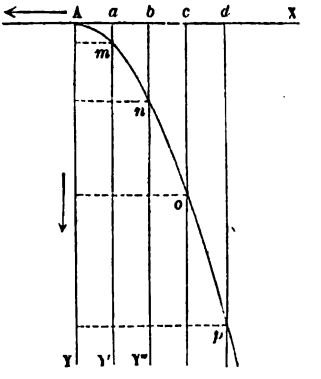


Fig. 10.

L'horizontale de départ AX étant marquée, divisons-la en parties égales; ces parties correspondent à des temps égaux, puisque le mouvement de rotation du cylindre est uniforme, et l'on peut considérer ces longueurs Aa, ab, cd... comme mesurant les temps. Les ordonnées correspondantes am, bn, co, dp donneront les espaces parcourus par le corps, qui tombe dans des temps t, $2t$, $3t$, $4t$..., et l'on vérifie que les longueurs am, bn, co, dp sont entre elles comme les nombres 1. 4. 9. 16. Donc la formule $e = kt^2$ est vérifiée. Il en découle immédiatement : $v = 2kt$, et $g = 2k$. Les formules générales de la chute des corps sont donc

$$e = \frac{gt^2}{2} \qquad v = gt.$$

On peut vérifier directement la loi des vitesses, en menant les tangentes aux points m, n, o; leur coefficient angulaire sera $\frac{de}{dt}$, ou la vitesse. Or ce coefficient angulaire est la tangente trigonométrique de l'angle que fait la tangente à la courbe avec l'axe des temps AX. La vérification graphique est donc facile.

Avant de quitter l'étude de la pesanteur, n'oublions pas qu'elle est variable dans les différents lieux du globe, cela tient à la forme aplatie de la terre. L'intensité g de la pesanteur et la longueur du pendule à secondes que nous avons données, sont celles que l'on trouve à Paris.

Poids spécifiques des solides et des liquides. — La densité d'un corps est le rapport du poids au volume. Le poids spécifique est le rapport du poids du corps au poids d'un égal volume d'eau. Comme nous avons pris pour unité de poids le poids de l'eau sous l'unité de volume, la densité et le poids spécifique sont représentés par le même nombre.

Si D est la densité, c'est le poids de l'unité de volume; donc le poids d'un volume V du même corps sera $P = VD$.

Densités des solides et des liquides. — Mesurer le volume et le poids, $D = \frac{P}{V}$. Cette méthode simple donne une grossière approximation; elle est suffisante en bien des cas pour les matériaux de construction.

1° *Détermination par la balance hydrostatique.* — La balance hydrostatique est celle qui sert à vérifier le principe d'Archimède, qui s'énonce comme il suit : un corps plongé dans l'eau perd une partie de son poids égal au poids du volume d'eau déplacé.

Si l'on a un solide, on le suspend par un fil de platine très-fin sous le plateau de la balance, et on le pèse dans cette position, soit p son poids. Faisons maintenant descendre le corps dans un vase d'eau placé dessous, il perd de son poids, le plateau de la balance se relève, et pour le ramener à l'horizontalité, il faut

ajouter des poids gradués p_1, représentant le poids de l'eau déplacée. La densité $d = \frac{p}{p_1}$. Veut-on la densité d'un liquide : on suspend au plateau de la balance une boule de verre lestée ou un bouchon de carafe que l'on équilibre. On le plonge d'abord dans le liquide, puis dans l'eau; dans chaque cas, il faut,

Fig. 11.

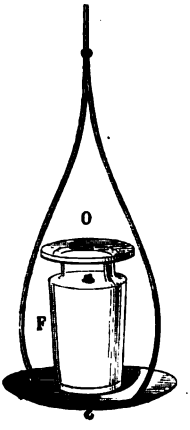


Fig. 12.

Fig. 13.

pour ramener le fléau à l'horizontalité, ajouter des poids p et p_1 dans le plateau; la densité du liquide est $d = \frac{p}{p_1}$.

2° *Détermination par la méthode du flacon.* — Si l'on a un solide, on pèse à côté l'un de l'autre le corps et le flacon F plein d'eau. On enlève le corps, et on le remplace par des poids gradués qui en donnent le poids p. On enlève ces poids gradués, on introduit le corps dans le flacon, il en fait sortir un volume d'eau égal au sien, on remet le tout sur le plateau; il faut, pour rétablir l'horizontalité, ajouter des poids p_1. La densité est $\frac{p}{p_1}$.

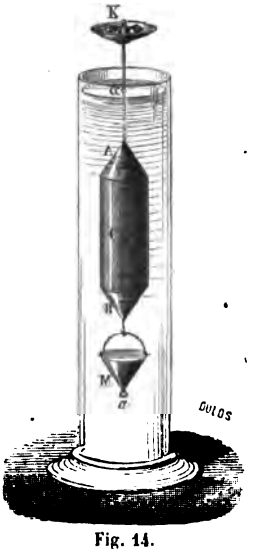


Fig. 14.

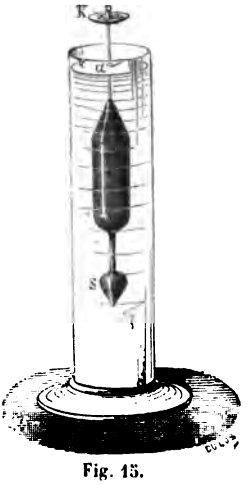


Fig. 15.

Si l'on a un liquide, on se sert du flacon effilé que montre la figure 13; avec du papier buvard on amène le liquide à affleurer le trait α, et on pèse le flacon vide, plein de liquide et plein d'eau; soit p_0, p et p_1 les poids, $d = \frac{p - p_0}{p_1 - p_0}$.

3° *Aréomètre ou balance de Nicholson.* — ACB est un cylindre avec double

cône, creux, en laiton; il est surmonté d'une tige portant la capsule K, et porte le panier conique M, qui est lesté et recouvert d'un grillage. On plonge l'appareil dans l'eau, et on le fait enfoncer jusqu'au trait fixe α, en plaçant dans la capsule le corps avec des grains de plomb. On enlève le corps, et on ajoute des poids p pour reproduire l'affleurement; p est le poids du corps. Plaçons-le maintenant dans le petit panier, enlevons les poids p, il nous faudra en ajouter d'autres p_1 pour amener l'affleurement; p_1 sera le poids de l'eau déplacée par le corps $d = \frac{p}{p_1}$. Le grillage sert à arrêter les corps qui seraient plus légers que l'eau.

4° *Aréomètre de Fahrenheit.* — Il est en verre, et la boule inférieure est lestée. Soit P le poids de l'appareil. On le fait affleurer au trait α, en le plongeant dans le liquide donné, puis dans l'eau, et pour cela il faut ajouter dans la petite coupe des poids p et p_1. Les poids de liquide et d'eau déplacés sont $P+p$ et $P+p_1$, par suite la densité $D = \frac{P+p}{P+p_1}$. (*Fig.* 15.)

Appareils servant à mesurer la concentration des liqueurs. — Pèse-sels. — Pèse-acides. — Les aréomètres précédents sont à volume constant, puisqu'on les fait toujours plonger jusqu'à un trait fixe. Il en est d'autres à poids constant, qui servent à donner des renseignements sur la densité d'une liqueur ou d'un mélange; l'exemple le plus usuel est celui de l'alcoomètre, dont la tige est à 0° dans l'eau pure et à 100° dans l'alcool pur, on comprend bien d'après cela ce que c'est que de l'alcool à 45°, par exemple; la graduation est faite de telle sorte, que le numéro de l'affleurement indique le nombre de centièmes d'alcool pur contenu dans le mélange. La graduation offrait une grande difficulté, car, par exemple, 80 d'alcool et 20 d'eau ne donnent pas pour volume 100, il y a contraction, et l'on obtient un volume inférieur à 100. Il faut donc de la densité du mélange conclure la contraction éprouvée, et calculer ainsi comment on devra composer un mélange contenant 80 pour 100 d'alcool.

La température influe beaucoup sur les résultats : des tables de correction sont dressées pour les diverses températures, car les expériences ont été faites à 15°. Le génie de Gay-Lussac a été nécessaire pour mener à bonne fin ce travail délicat.

Les aréomètres de Baumé sont les plus usuels. — Celui qui est destiné aux liquides plus denses que l'eau est lesté de façon que le zéro soit en haut de la tige; le numéro quinze est au point d'affleurement dans un mélange de 15 parties de sel marin et de 85 d'eau. On divise l'intervalle 0 à 15 en 15 parties égales et on prolonge la division. Pour les liquides moins lourds que l'eau, le zéro est à la base de la tige; il correspond à l'affleurement dans un mélange de 10 parties de sel marin avec 90 d'eau; le numéro 10 est à l'affleurement dans l'eau pure. On fait la division comme plus haut.

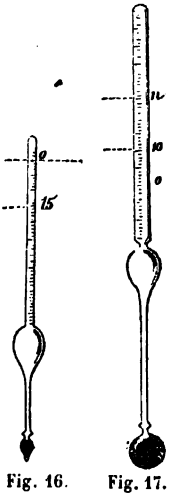


Fig. 16. Fig. 17.

Ces appareils donnent un moyen rapide de vérification des liqueurs : ainsi, l'acide sulfurique marque 66°, l'acide azotique 36° au premier aréomètre.

Remarques. — Quand un corps est soluble dans l'eau, on prend sa densité relativement à un autre liquide, et on multiplie cette densité par la densité absolue du liquide. Si un corps est poreux, il a deux densités, suivant qu'on laisse ou

qu'on ne laisse pas l'eau pénétrer à l'intérieur. Dans le premier cas, on l'enduit d'une fine couche de résine et l'eau n'entre pas. Dans le second cas, il faut avoir la précaution de laisser la substance s'imbiber pendant longtemps dans l'eau ; la quantité d'eau qu'un corps peut absorber est intéressante à connaître, notamment pour les pavés et les pierres en général.

TABLEAU DES DENSITÉS DE QUELQUES CORPS A 0°, LA DENSITÉ DE L'EAU ÉTANT 1 A LA TEMPÉRATURE DE 4°

1° *Solides.*

Platine laminé	22,069
Platine forgé	20,337
Or forgé	19,362
Or fondu	19,258
Plomb fondu	11,352
Argent fondu	10,474
Bismuth fondu	9,822
Cuivre rouge fondu	8,788
Acier non écroui	7,816
Fer en barre	7,788
Fer fondu	7,207
Étain fondu	7,291
Zinc fondu	6,861
Antimoine fondu	6,712
Diamant	3,531
Marbre statuaire	2,837
Verre de St-Gobain	2,488
Porcelaine de Sèvres	2,146
Soufre natif	2,033
Houille compacte	1,329
Glace fondante	0,930
Bois de hêtre	0,852
Bois de sapin jaune	0,657
Liége	0,240

2° *Liquides.*

Mercure	13,578
Acide sulfurique	1,831
Acide chlorhydrique	1,210
Acide azotique	1,420
Lait	1,003
Eau de mer	1,026
Eau distillée à 0°	0,999
Vin de Bordeaux	0,994
Huile d'olive	0,915
Alcool absolu	0,792
Ether sulfurique	0,715

Élasticité et compressibilité des solides. — Les solides sont élastiques, c'est-à-dire que, soumis à une extension ou à une compression, ils reprennent leur état primitif quand la force cesse, pourvu que l'on n'ait pas dépassé une certaine limite indiquée par l'expérience. Passé cette limite, la déformation est permanente, jusqu'à ce qu'on arrive à un autre phénomène : l'écrasement ou la rupture du corps.

Pourvu que l'on reste dans les limites de l'élasticité, on démontre que l'allongement d'un corps par la traction d'un certain poids est égal à son raccourcissement sous la compression du même poids. Il suffit donc d'étudier l'allongement produit par une traction : on choisit des barres métalliques, par exemple, dont on saisit l'extrémité supérieure dans une pince invariable, et l'extrémité inférieure est saisie par une autre pince qui supporte un plateau où l'on met des poids. On a soin de charger ce plateau peu à peu pour éviter tout choc brusque, et si l'on a fait deux traits bien apparents sur la tige métallique, il est facile de mesurer à chaque instant leur nouvel écartement, grâce au cathétomètre, appareil formé d'une lunette horizontale qui se meut sur une tige verticale graduée. On reconnaît par ce moyen : 1° que les allongements sont proportionnels aux poids dont on charge la tige ; 2° qu'ils sont proportionnels aux longueurs des tiges, et 3° inversement proportionnels aux sections des tiges. On reconnaît aussi que le volume de la tige augmente : le métal est donc extensible en volume ; il est aussi compressible, ainsi qu'on le constate sur le fer martelé, laminé ou écroué. En effet, il se produit alors une augmentation de densité.

Les pierres ont une élasticité très-faible.

Les liquides sont presque incompressibles : l'eau, comprimée fortement dans des conduites métalliques, suinte à travers plutôt que de se comprimer. Cependant, on a démontré qu'en réalité elle est compressible, mais d'une quantité presque insignifiante. Voici quelques coefficients de compressibilité des liquides :

Eau à 0°	50	millionièmes.
Eau à 11°	48	—
Mercure à 0°	3	—
Éther à 0°	111	—
Alcool à 7°	38	—

CHAPITRE II

HYDROSTATIQUE

Pression des liquides. — Vases communiquants; presse hydraulique. — Principe d'Archimède; aréomètres. — Notions sur les phénomènes capillaires. — Pression des gaz. — Baromètres; mesure des hauteurs. — Loi de Mariotte. — Machine pneumatique et de compression; pompes. — Siphon. — Gazomètre. — Poids spécifiques des gaz.

Pression des liquides. — Quand un liquide est en équilibre dans un vase, c'est-à-dire quand tous ses points sont en repos, il remplit deux conditions : 1° la surface libre est horizontale ; 2° chaque molécule liquide est également pressée dans tous les sens.

1° La surface libre est horizontale, nous l'avons déjà vérifié expérimentalement. On peut le démontrer autrement : chaque molécule est sollicitée par une force verticale, son poids ; le poids peut se décomposer en deux forces, dirigées l'une suivant la tangente, l'autre suivant la normale à la surface; or, la force normale ne pourrait que comprimer le liquide, et il est incompressible, elle se trouve détruite ; donc, la force tangentielle restera seule, et, comme il n'y a pas de frottement d'un liquide sur lui-même, la molécule se déplacera jusqu'à ce que la force tangentielle soit nulle, ce qui a lieu lorsque la normale à la surface libre coïncide avec la verticale. Dans ce cas cette surface libre est horizontale.

2° Chaque molécule liquide est également pressée dans tous les sens.

Principe de Pascal. — « Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, dont l'une soit centuple de l'autre, en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes, poussant le grand piston, et en surmontera quatre-vingt-dix-neuf. Quelque proportion qu'aient ces ouvertures et quelque direction qu'aient les pistons, si les forces qu'on met sur les pistons sont entre elles comme les ouvertures, elles seront en équilibre. »

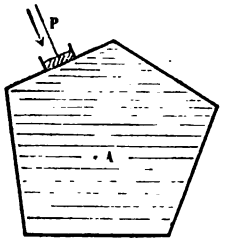


Fig. 18.

C'est en ces termes que le puissant génie de Pascal énonçait la célèbre proposition qu'il avait si logiquement déduite de la fluidité des liquides.

Ainsi, les liquides transmettent avec la même intensité dans tous les sens les pressions exercées sur un point quelconque de leur masse.

Imaginons un vase de forme quelconque rempli par un liquide, et exerçons une pression (p) en une partie de ce liquide ; si A' était un corps solide, la pression p produirait une compression et une déformation dans la direction où elle agit. Mais, ici, à cause de la fluidité, les molécules placées sous le piston tendent

à se déplacer et elles poussent non-seulement celles qui sont sous elles, mais encore toutes celles qui les environnent; c'est un effet analogue à celui qui se produit quand on enfonce la main dans un sac de graines : le sac se gonfle de toutes parts, parce qu'il est rempli d'éléments indépendants les uns des autres. Toutes les molécules du liquide s'animent de proche en proche d'un mouvement qui transmet à chacune d'elles, dans quelque direction qu'elle soit, la pression reçue primitivement par une molécule quelconque.

Malheureusement, l'expérience n'est pas réalisable, car, en pratique, nous ne pouvons, comme dans ce qui précède, faire abstraction de la pesanteur, et la pesanteur agira d'une manière variable sur les divers pistons suivant leur position.

Mais le principe de Pascal, s'il n'est point directement démontrable, se trouve néanmoins parfaitement établi quand on considère la presse hydraulique, qui est une application féconde de ce principe.

Presse hydraulique. — P est une pompe aspirante et foulante qui, au moyen

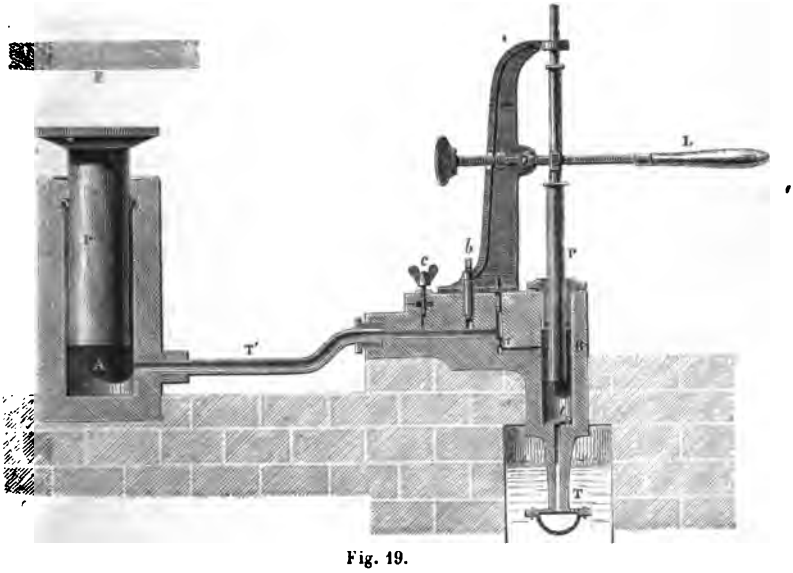


Fig. 19.

de la crépine T et de la soupape *t*, s'ouvrant de bas en haut, puise de l'eau d'un réservoir pour l'envoyer par la soupape *a* et le conduit T′ sous le piston A. La pompe est manœuvrée par la manette L, et l'effort exercé par le piston B se transmet au piston A autant de fois que la section de celui-ci contient la section du premier. Le grand piston est terminé par une plate-forme qui, en se rapprochant peu à peu du plafond invariable F, comprime les corps interposés. La soupape *b* est une soupape de sûreté s'ouvrant sous une pression déterminée ; la vis (*c*) forme robinet et permet d'évacuer l'eau de A et de faire baisser le grand piston.

Avec cette presse, on comprime le coton en balles; on condense les fourrages à transporter; on exprime le jus des betteraves, l'huile du colza ; on essaye les canons et les chaudières, les tuyaux, etc.

Pressions dues à la pesanteur. — 1° La pression sur chaque tranche d'un

liquide homogène est proportionnelle à la profondeur du liquide au-dessous de la surface libre.

Preuve expérimentale : Fermons un tube en verre par un disque bien poli de verre (*o*), et plongeons-le dans un liquide : la pression qui s'exerce de bas en haut sur le disque le maintient contre le tube, et pour faire tomber le disque dans les positions *m* et *m'*, il est nécessaire de verser dans le tube assez d'eau pour que le niveau à l'intérieur coïncide avec le niveau *ab* de l'extérieur. Pour que l'expérience soit bien concluante, il est nécessaire de faire passer la ficelle soutenant le disque sur une poulie et de faire équilibre par un contre-poids au poids du disque en verre. Ainsi, si *h* et *h'* sont les profondeurs des tranches XY et X'Y' au-dessous de la surface libre *ab*, les pressions sur le disque de surface *s* seront $p = sh$ $p' = sh'$.

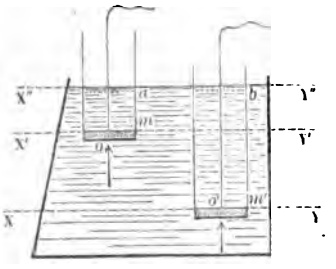


Fig. 20.

2° De là résulte que la pression est constante en tous les points d'une même tranche horizontale.

3° La pression sur une tranche quelconque dépend seulement de la surface de la tranche et de sa profondeur : elle est indépendante de la forme du vase. Ceci est une conséquence des lois précédentes et de la transmission des pressions. Il suffit qu'un point d'une tranche horizontale soit directement pressé par une colonne d'eau pour que la pression qu'il supporte soit transmise à tous les points voisins, quand même ces derniers n'auraient directement au-dessus d'eux qu'une hauteur d'eau très-faible.

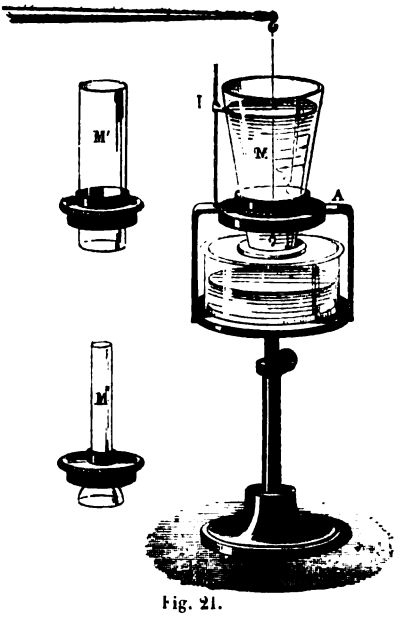


Fig. 21.

D'après cela, la pression sur le fond d'un vase ne dépend que de la surface de ce fond et de la hauteur du liquide dans le vase ; cette pression est indépendante de la forme du vase. En effet, soit trois vases M, M', M'', de forme différente, mais de même section à la base, on prend pour fond mobile un obturateur en verre suspendu à l'extrémité du fléau de la balance hydrostatique. A l'autre extrémité du fléau, dans le plateau, on suspend un poids P, on adapte l'un des vases M sur la monture A, et on y verse de l'eau jusqu'à ce que le fond mobile commence à se séparer du vase ; c'est qu'alors il y a équilibre entre le poids P et la pression de l'eau sur le fond du vase M. Au moyen de l'index I, on marque la hauteur de l'eau dans le vase M ; on recommence l'opération avec les vases M' et M'' sans changer le poids P, et l'on voit que, pour ces vases aussi, le fond se détache au moment où l'eau atteint le niveau marqué par l'index. Donc, la proposition est démontrée.

Pressions sur les parois. — Il existe sur les parois du vase des pressions

que nous calculerons en hydraulique, et qui en chaque point sont représentées par la distance verticale de ce point à la surface libre. Nous mettrons ces pressions en évidence par l'expérience du tourniquet hydraulique : un vase V est prolongé par un tube vertical qui se ramifie en deux branches horizontales recourbées à leur extrémité. L'eau du vase V descend dans ces branches, s'échappe, et l'appareil prend un mouvement de rotation en sens inverse de l'écoulement produit. C'est que là où existe l'orifice, il y avait une paroi, et, par suite, une pression qui annulait la pression s'exerçant au fond de la branche recourbée; cette dernière reste seule et produit son effet en entraînant l'appareil en sens inverse de l'écoulement. On peut varier l'expérience au moyen d'un petit chariot bien mobile dont la paroi postérieure est percée d'un orifice : on remplit d'eau la caisse du chariot, on ouvre l'orifice et l'appareil se meut dans la direction opposée à l'écoulement.

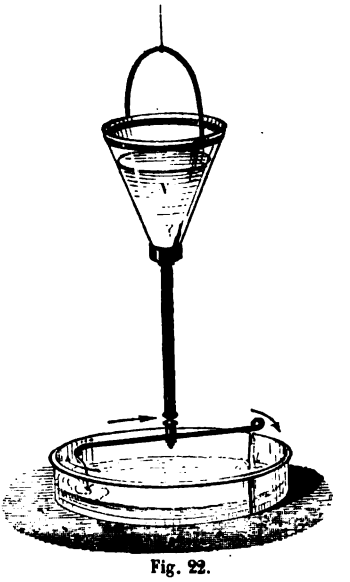


Fig. 22.

Paradoxe hydrostatique. — Une conséquence curieuse de la pression sur le fond des vases est le paradoxe hydrostatique : on peut, avec une quantité faible de liquide, en donnant à un vase la forme de la figure ci-jointe, produire sur le fond une pression énorme, puisque cette pression est égale à la surface AB multipliée par la hauteur qui sépare AB de la surface libre GH. En particulier, chose extraordinaire, on peut faire en sorte que la pression sur le fond du vase soit de beaucoup supérieure au poids de l'ensemble. Ainsi, il est facile de faire voler en éclats un tonneau plein d'eau que l'on surmonte d'un tube aussi mince qu'on le veut et renfermant une haute colonne d'eau.

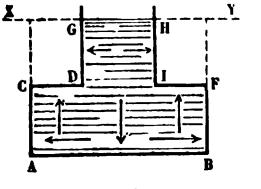


Fig. 23.

Vases communiquants. — Lorsqu'il s'agit d'un même liquide, les surfaces libres dans tous les vases communiquants sont situées dans un même plan horizontal, quelle que soit la forme du vase; en effet, une section du canal de communication doit être également pressée dans les deux sens, et, comme la pression ne dépend que des hauteurs, il faut que ces hauteurs soient égales; c'est ce qu'on vérifie avec l'appareil ci-joint; dont le mécanisme se comprend à la seule inspection de la figure.

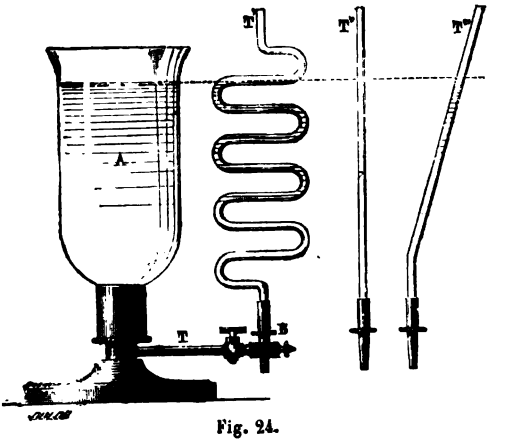


Fig. 24.

Si l'on a des liquides de den-

sités différentes, les hauteurs dans chaque vase sont en raison inverse des densités : c'est encore la conséquence de ce fait que la pression doit être la même dans les deux sens pour la surface de séparation des liquides.

La principale application du principe des vases communiquants est le niveau d'eau, dont le lecteur connaît bien l'emploi.

Liquides mélangés. — Lorsque plusieurs liquides sont mélangés, il ressort immédiatement des principes précédents que : 1° ils se disposent dans l'ordre de leur densité ; 2° que les surfaces de séparation sont horizontales. Il est facile de le vérifier en mélangeant dans un verre du mercure, de l'eau et de l'huile.

Principe d'Archimède. — Un jour, au sortir du bain, Archimède courait presque nu à travers les rues de Syracuse, en criant « J'ai trouvé. » Qu'avait-il trouvé? C'était le principe suivant : Tout corps plongé dans un liquide est soumis à une force ascensionnelle égale au poids du volume d'eau qu'il déplace. Ce principe nous a été fort utile pour la recherche des densités.

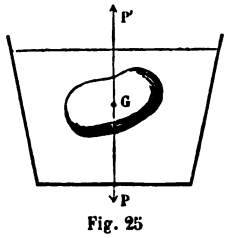


Fig. 25

En voici la démonstration :

Soit, dans un vase, une masse d'eau ; concevons-en une portion G, de volume et de forme quelconques, comme isolée ; cette portion est en équilibre : donc les forces qui la sollicitent se détruisent ; or les forces extérieures se réduisent au poids P ; il faut donc que les forces intérieures provenant du liquide lui-même soient égales, de signe contraire et

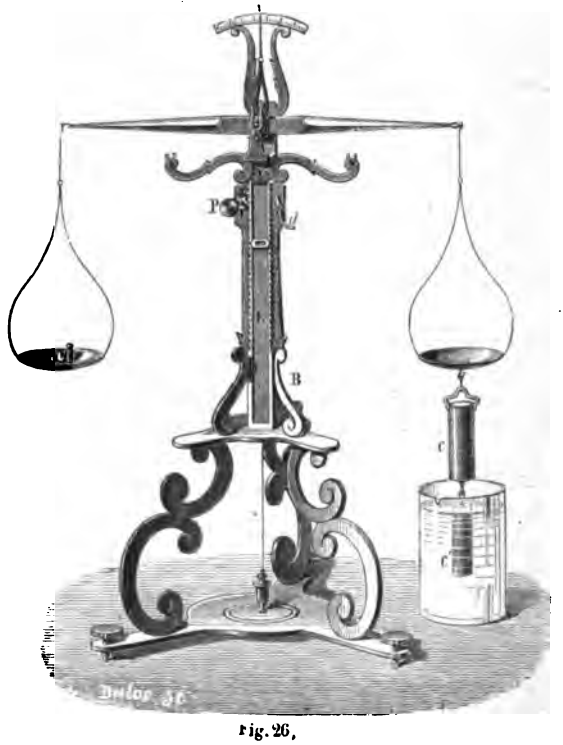


Fig. 26.

appliquées au même point, le centre de gravité.

Supposons, à la place de l'élément liquide, un corps quelconque de même forme ; il n'y aura rien de changé à ces forces provenant de l'action du liquide lui-même, et les pressions se composent en une seule, égale au poids du volume de liquide déplacé et appliquée au centre de gravité de ce volume.

Démonstration expérimentale. — Soit deux cylindres de laiton C et C', le premier est creux, le second est plein et pénètre exactement dans la cavité du premier. On les suspend l'un à l'autre et au plateau de la balance hydrostatique, balance dont la colonne est creuse et renferme une crémaillère se manœuvrant par le pignon P et permettant d'abaisser ou d'élever le fléau. Les cylindres C et C' sont équilibrés par des poids de telle sorte, que le fléau revienne à l'horizontale ; puis on descend le fléau pour faire plonger C' dans un vase plein d'eau ; il y a perte de poids par suite de la poussée, le fléau s'incline du côté des poids gradués, et, pour le ramener, il faut avec une pipette remplir d'eau le cylindre creux C. Cette expérience est la traduction matérielle de l'énoncé du principe.

Les corps flottants obéissent au principe d'Archimède : le poids du volume d'eau déplacé par un navire est égal au poids total du navire.

Notions sur les phénomènes capillaires. — Nous avons exposé, au commencement de cet ouvrage, quelques considérations sur la constitution intime des corps ; nous avons vu qu'il ne fallait point les considérer comme des masses continues, mais plutôt comme un assemblage de molécules infiniment rapprochées par une attraction particulière qui augmente très-rapidement quand la distance diminue de plus en plus. Nous avons fait voir comment la cohésion est en lutte avec la chaleur et comment de cette lutte résultent les trois états : solide, liquide et gazeux.

Nous allons étudier actuellement quelques phénomènes d'attraction que l'on observe au contact des solides et des liquides.

En voici un exemple usuel : plongez dans un liquide une baguette de verre et retirez-la ; une goutte de liquide reste adhérente au bout de la baguette ; il y a donc là une attraction entre le verre et le liquide ; du même coup on démontre l'attraction du liquide sur lui-même, car, imaginez une section horizontale de la goutte, les parties supérieures retiennent suspendues celles qui sont au-dessous, et pour cela exercent une certaine force.

L'attraction des solides pour les liquides donne lieu aux phénomènes capillaires (ils portent ce nom parce qu'on les remarque au plus haut degré dans des tubes de petit diamètre comparables à un cheveu).

1° Cas d'un liquide qui mouille le solide :

Plongez dans de l'eau un tube de verre très-fin T, le niveau du liquide s'élèvera en M au-dessus de la surface libre XY, et la surface en M n'est pas horizontale, mais creuse, c'est-à-dire concave ; cette surface est un ménisque. On observe en outre un petit bourrelet de liquide qui s'élève autour du tube en *aa'* ; ce bourrelet est facile à observer toutes les fois qu'on plonge une lame de verre dans l'eau, on la voit encore sur les bords d'un verre qui n'est pas rempli. Si, au lieu d'un tube, on a deux lames parallèles, le même phénomène se produit, mais le ménisque, au lieu d'affecter la forme d'une calotte sphérique concave, affecte celle d'un demi-cylindre concave à génératrices horizontales (*fig.* 28).

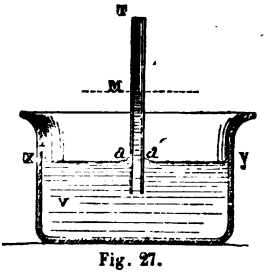


Fig. 27.

2° Cas d'un liquide qui ne mouille pas le solide (*fig.* 29).

Au lieu d'eau, si l'on prend du mercure liquide qui ne mouille pas le verre,

l'effet est inverse : il y a dépression dans le tube ou entre les lames, les saillies *a* et *a'* deviennent des creux, le ménisque est convexe.

Lois expérimentales de la capillarité. — Si le liquide mouille le solide, la hauteur d'ascension est indépendante de la substance et de l'épaisseur du tube; elle varie proportionnellement au diamètre du tube ou à l'écartement des lames,

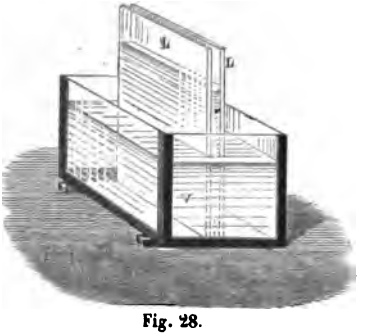


Fig. 28.

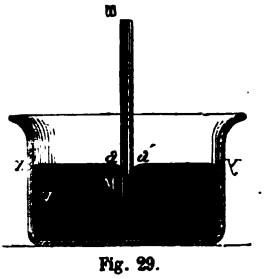


Fig. 29.

et dans le cas des lames elle est moitié de ce qu'elle est avec un tube d'un diamètre égal à l'écartement des lames; l'ascension varie encore avec la nature du liquide, et c'est l'eau qui présente au maximum les phénomènes capillaires.

Si le liquide mouille le solide, les parois du tube se trouvent humectées et lubrifiées par une pellicule mince du liquide qui existe encore lorsque le phénomène a cessé ; à dire vrai, c'est donc dans un tube liquide que se fait l'ascension. Mais, lorsque le solide n'est pas mouillé, la substance qui le compose reprend son influence; il est impossible qu'elle soit parfaitement lisse, et les lois précédentes ne se vérifient plus avec la même exactitude.

Quoi qu'il en soit, on voit qu'il y a dans la capillarité une cause de perturbation pour les thermomètres et baromètres, et, dans des observations précises, il y aura lieu d'en tenir compte.

Pression des gaz. — Baromètres. — Loi de Mariotte. — *État moléculaire d'un gaz.* — Nous avons déjà vu que dans un gaz la cohésion est vaincue par la chaleur; elle est même négative, puisqu'un gaz tend à occuper tout entier l'espace qu'on lui offre. L'expérience suivante le montre bien : une vessie chiffonnée est placée dans le récipient de la machine pneumatique, on fait le vide et elle se gonfle de plus en plus à mesure que la raréfaction de l'air augmente, jusqu'à ce qu'elle éclate. Un gaz odorant ou coloré peut de même se répandre dans un très-grand espace.

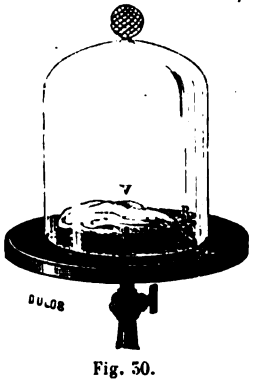


Fig. 30.

Si les gaz sont presque indéfiniment expansibles, ils doivent être nécessairement compressibles. La compressibilité en est mise en évidence par le briquet à air : si on enfonce brusquement le piston P dans le tube, l'air se comprime et s'échauffe au point d'enflammer un morceau d'amadou placé sur le piston P (*fig.* 31).

L'air est donc capable, en se dilatant et en se comprimant, de produire une certaine force ; c'est donc quelque chose de matériel qui doit être pesant, et, en effet, un litre d'air dans les conditions normales, à 0° et sous une pression baro-

métrique de $0^m,76$ de mercure, pèse 1^{gr}, 293, et l'on peut d'une façon approximative déterminer ce poids en pesant un ballon de verre d'abord plein d'air, puis vide.

La différence donne le poids d'un volume d'air connu.

Les gaz rentrent, comme les liquides, dans la classe des fluides, c'est-à-dire que leurs molécules possèdent une mobilité parfaite et glissent les unes sur les autres sans frottement ; en réalité, l'absence de frottement des molécules liquides ou gazeuses, les unes sur les autres, est une hypothèse théorique : elle s'approche de la vérité, mais n'est point absolue ; dans la plupart des cas, le frottement à l'intérieur des fluides est très-faible, mais il est tels cas de la pratique, l'écoulement des liquides par exemple, où ce frottement est très-accusé et apporte aux

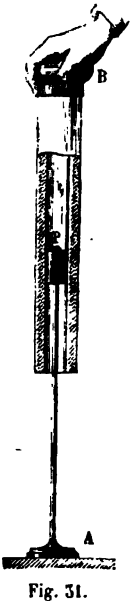


Fig. 31.

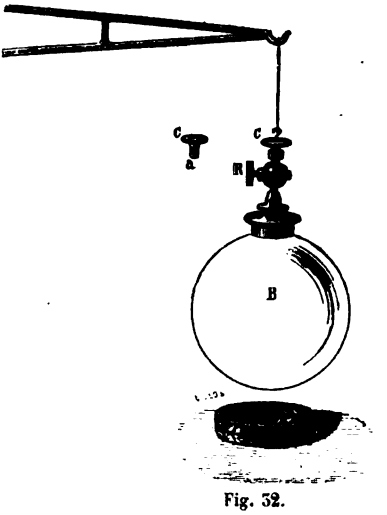


Fig. 32.

lois théoriques de sérieuses modifications. Cette réserve faite, nous dirons que toutes les propriétés démontrées pour les liquides et qui tiennent à la fluidité seule séparée de l'incompressibilité, sont applicables au gaz. Ainsi, dans les gaz, les pressions se transmettent dans tous les sens proportionnellement aux surfaces ; dans un plan horizontal, la pression est constante et égale à la surface de la section multipliée par la distance verticale qui sépare le plan de la surface libre. Dans la pratique, lorsqu'un gaz est renfermé dans un vase, la vapeur d'eau dans une chaudière, par exemple, on admet que la pression est la même sur toute l'étendue des parois ; et, en effet, les gaz sont très-légers et la variation de pression due aux poids des tranches supérieures est très-faible, du moins dans les limites nécessairement bornées des machines et appareils usuels.

On peut admettre que le principe de Pascal s'applique absolument aux gaz renfermés dans nos appareils, et qu'il n'est point masqué par l'intervention de la pesanteur.

Pression atmosphérique. — L'air est pesant, donc il exerce une pression sur tous les corps qui s'y trouvent plongés. La chose est maintenant évidente

pour nous ; les expériences suivantes la rendront plus frappante : faisons le vide dans le vase C, fermé par un parchemin ; le parchemin se creuse sous la pression et finit par crever avec une détonation due à la rentrée brusque de l'air. Vissons sur l'ajutage de la machine pneumatique deux demi-sphères creuses qui peuvent

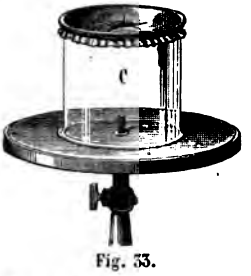


Fig. 33.

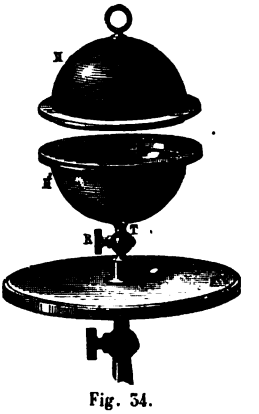


Fig. 34.

se rapprocher, faisons-y le vide et fermons le robinet R ; malgré de grands efforts, nous ne pourrons séparer les deux parties. Otto, bourgmestre de Magdebourg, inventeur de la machine pneumatique, fit cette expérience en grand et attela plusieurs chevaux à l'appareil ; ils furent impuissants à produire la sépa-

Fig. 35.

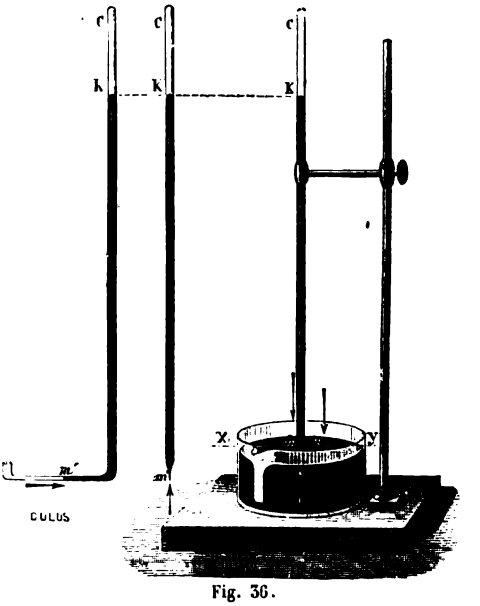


Fig. 36.

ration. Mais ouvrons le robinet R, laissons rentrer l'air, aussitôt les deux hémisphères se séparent sans peine.

Expérience de Torricelli. — En 1643, Torricelli, élève de Galilée, reconnut qu'en emplissant de mercure un tube de verre et le retournant dans un bain de mercure, sans y laisser rentrer d'air, le mercure ne descendait pas complétement et restait à une hauteur de $0^m,76$ environ au-dessus du mercure de la cuvette. Or la cuvette et le tube forment deux vases communiquants remplis du même liquide; la pression y est la même en tout point d'un plan horizontal XY. La pression atmosphérique est donc représentée par une colonne de mercure de $0^m,76$ de hauteur, ou, sur un centimètre carré, elle est égale au poids de 76 centimètres cubes, soit à $1^k,033$ (la densité du mercure est 13,598). Une pression double, triple, etc., compose une pression de deux, de trois... atmosphères : l'atmosphère est l'unité de pression pour les gaz. En pratique, on admet qu'une atmosphère est une pression de 1 kil. par centimètre carré ; c'est ainsi qu'une chaudière à vapeur étant timbrée à 3 kil., 6 kil., est dite de la force de 5, 6, atmosphères.

Expériences de Pascal. — Si la colonne barométrique est soulevée par la pression atmosphérique, la hauteur de cette colonne doit varier avec la pression de l'air, c'est-à-dire : 1° avec l'état atmosphérique en un même lieu, suivant que les ondes des vents sont condensées ou raréfiées ; 2° avec l'altitude, et, en effet, Pascal vérifia l'influence de l'altitude sur le Puy de Dôme, où il vit la colonne barométrique s'abaisser progressivement à mesure que l'on montait, et son expérience est le point de départ d'une méthode de nivellement par le baromètre.

Au lieu du mercure, on peut employer dans l'expérience de Torricelli tout autre liquide, et alors les hauteurs barométriques sont en raison inverse des densités. Le baromètre à l'eau donnerait une colonne liquide de $0^m,76 \times 13,598$, soit $10^m,33$; c'était, à l'époque de Pascal, une hauteur de 32 pieds. On s'était étonné longtemps de voir les pompes ordinaires ne plus fonctionner au delà de 32 pieds, quelle que fût l'adresse du constructeur, et, comme on expliquait l'ascension de l'eau par ce fait que la nature a horreur du vide, il est probable qu'on ajoutait : la nature a horreur du vide seulement jusqu'à 32 pieds. Les expériences de Pascal éclaircirent tout cela.

Construction d'un baromètre. — Prendre un tube de verre de $0^m,90$ environ, le laver à l'acide nitrique, le remplir de mercure et lui souder une ampoule de verre, puis faire bouillir le liquide en commençant par le bas. De nombreuses bulles d'air se dégagent et soulèvent la colonne mercurielle, qui retombe avec choc ; l'opération ne laisse point que d'être assez délicate. L'ampoule de verre empêche le mercure de s'échapper et surtout de s'oxyder au contact d'un air renouvelé. Lorsque le mercure renferme quelques parcelles d'oxyde, il devient fileux et s'attache au verre ; on dit qu'il fait la queue.

Fig. 37.

Des baromètres de laboratoires. — 1° *Baromètre fixe de laboratoire* (*fig.* 38). — Au moyen de la vis *v*, on amène la pointe *m* au contact du mercure de la cuvette, on voit la pointe de l'objet et la pointe de l'image s'avancer l'une vers l'autre ; au moment où les pointes se touchent, le contact a lieu. On connait une

fois pour toutes la longueur de la tige *mv*, et on vise avec un cathétomètre fixe établi à cet effet la tige *v*, puis le sommet du ménisque (*a*) ; on obtient de la sorte la hauteur du mercure avec une parfaite précision.

2° *Baromètre à cuvette ordinaire.* — La graduation est fixe et appliquée le long du tube; mais on suppose que le 0 est fixe, ce qui n'est pas, puisque du mercure rentre dans la cuvette ou en sort suivant que la pression diminue ou augmente. Cette erreur est faible si la section de la cuvette est considérable relativement à la section du tube. Un tel baromètre ne convient que pour de grossières observations (*fig.* 39).

3° *Baromètre de Fortin.* — Ici le zéro est fixe, c'est la pointe d'une aiguille d'ivoire que l'on amène au contact du mercure de la cuvette; pour cela, on soulève ou on abaisse le mercure de la cuvette au moyen de la vis V agissant sur le massif de buis D : à ce massif et à l'anneau de buis K est fixée une peau de cha-

Fig. 38.

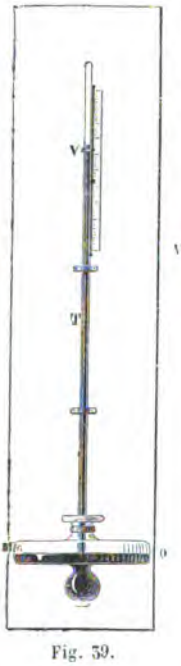


Fig. 39.

Fig. 40.

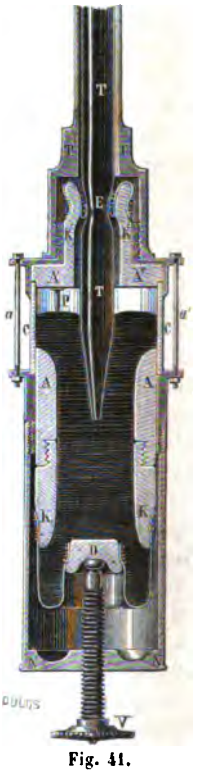


Fig. 41.

mois, qui est le fond mobile de la cuvette. La cuvette est métallique, sauf à la partie supérieure, ou des glaces CC sont protégées par des barreaux (*a*). Le tube T est contenu dans une gaine de cuivre; il est contracté en E, et entouré d'une peau de chamois qui le relie aux montures en buis K'. La lecture se fait en amenant par une vis un curseur en cuivre D affleurer le sommet du ménisque : ce curseur porte un vernier. En voyage, on se sert de la vis V pour relever le mercure, remplir la cuvette, et prévenir ainsi tout choc funeste du liquide. Et même, si le tube vient à casser, il est facile de dévisser la partie

inférieure de la cuvette au moyen des vis que l'on aperçoit entre les anneaux de buis A et K ; il est facile alors de remplacer le tube T, en mettant en E une nouvelle peau de chamois. L'appareil est souvent contenu dans un étui qui se développe de façon à faire un trépied auquel le baromètre est suspendu par

Fig. 42.

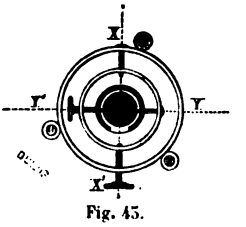


Fig. 43.

Fig. 44.

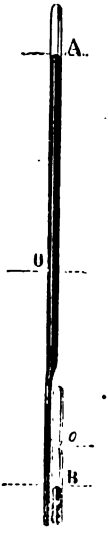


Fig. 45.

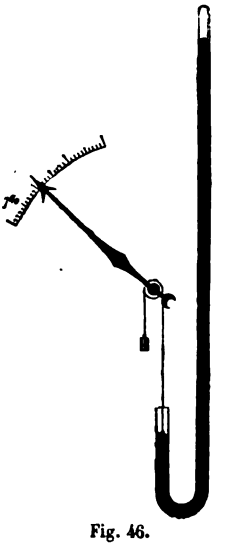


Fig. 46.

une suspension à la Cardan que représente la figure 43 : le cercle extérieur est fixe, le cercle intérieur mobile autour d'un axe horizontal XX′ ; ce cercle est traversé par l'axe YY′, autour duquel peut tourner le baromètre qui y est fixé. Cette suspension à la Cardan est celle qui sert à suspendre la boussole d'un navire dans sa boite ou habitacle : on voit qu'elle permet au corps qu'elle soutient de rester constamment vertical, quel que soit le mouvement du support.

4°. *Baromètre de Gay-Lussac, perfectionné par Bunsen.* — Le 0 est au milieu du tube, et il y a double graduation en A et B : la pression de l'air se fait sentir par le petit orifice (*o*), et pour empêcher les bulles d'air de pénétrer dans la chambre supérieure où règne le vide, le tube se compose de deux parties se raccordant par une pointe qui pénètre dans un renflement (*fig.* 44 *et* 45).

5° *Baromètre à cadran.* — Celui-ci n'est guère qu'un objet de pur ornement, vu sa faible sensibilité : un fil qui passe sur la gorge d'une poulie porte d'un côté un poids flottant sur le mercure, de l'autre un contre-poids. A l'axe de la poulie est fixée une aiguille qui tourne avec elle, en parcourant un cadran. On gradue le baromètre par comparaison avec un autre (*fig.* 46).

Fig. 47.

6° *Baromètre métallique de Bourdon.* — Dans une boîte en métal est enfermé un ressort creux, dont la section est M, et qui est courbé. Ce tube est vide d'air. Si la pression augmente, le tube s'aplatit, sa courbe se contracte, ses extrémités se rapprochent, font tourner le fléau *bb'* autour de son centre *o*, et le mouvement se transmet de ce centre à l'arc denté, au pignon et à l'aiguille centrale. Si la pression diminue, l'effet inverse se produit, la courbe se dilate. Cet appareil se gradue par comparaison avec un baromètre à mercure : il est très-sensible; nous l'avons vu en mer, placé dans une chambre du bateau, accuser par des mouvements brusques de son aiguille les rafales du vent.

Loi de Mariotte. — *A une même température, les volumes occupés par une masse de gaz déterminée varient en raison inverse des pressions qu'elle supporte.*

Vérification expérimentale : 1° *Pour les pressions supérieures à une atmosphère.* — On a un tube recourbé ACB, dont la grande branche est ouverte, la petite fermée : on verse dans l'appareil un peu de mercure, de façon à affleurer le zéro dans chaque branche : l'air confiné en B est alors à la pression de l'atmosphère. Versons maintenant du mercure dans la grande branche, de manière à comprimer l'air confiné et à réduire son volume à la moitié, au tiers, au quart... du volume initial; nous reconnaîtrons qu'il faudra pour cela des différences d'altitude des ménisques dans la grande et la petite branche égales à 2, 3, 4... fois la hauteur barométrique. La proposition est donc démontrée.

2° *Pour les pressions inférieures à une atmosphère.* — On a un tube A qu'on remplit presque de mercure, et qu'on renverse dans une cuvette profonde C : de l'air remonte en B, et y reste. En abaissant le tube, on peut s'arranger pour que les niveaux du mercure dans le tube et dans la cuvette soient les mêmes. Le tube est gradué : soulevons-le, de façon à rendre le volume du gaz 2, 3, 4, 5... fois plus grand, la pression va diminuer, le mercure s'élèvera de quantités égales à $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$... de la pression barométrique : la pression du gaz fait à chaque instant le complément de la pression barométrique, cette pression est donc $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, d'atmosphère, et la proposition est démontrée.

L'appareil de Mariotte ne permet d'aller que jusqu'à 8 ou 9 atmosphères. Dulong et Arago vérifièrent la loi jusqu'à 27 atmosphères, grâce à un long tube, qu'ils disposèrent fort ingénieusement dans la tour de Clovis, monument enclavé dans le lycée Napoléon.

Les gaz sont inégalement compressibles, ainsi qu'on peut le voir avec l'appareil ci-contre : dans deux éprouvettes E_1E', on place deux gaz différents, que l'on comprime au moyen de mercure comprimé lui-même par de l'eau, sur laquelle on agit par une vis de pression très-énergique. On reconnaît de la sorte que, en général, les gaz se compriment d'autant plus qu'on approche de leur

point de liquéfaction; la compression marche un peu plus vite que ne l'indique la loi, dans l'air et dans l'azote, un peu moins vite dans l'hydrogène. Enfin, l'a-

Fig. 48.

Fig. 49.

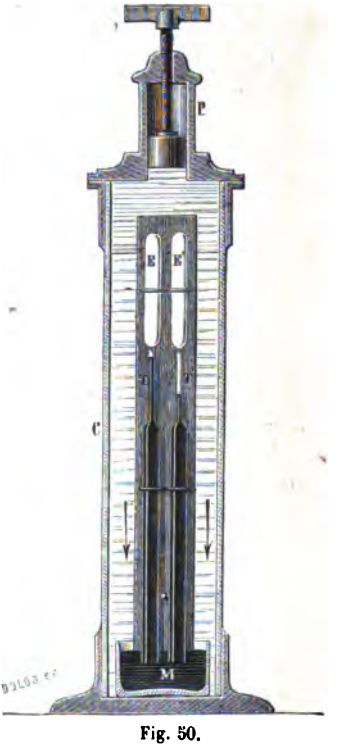


Fig. 50.

cide carbonique s'en écarte notablement, si on le soumet à des pressions un peu fortes.

M. Regnault, au moyen d'une pompe foulante énergique, qui faisait refluer le mercure dans une longue colonne de tuyaux, étudia la compression des gaz avec une exactitude merveilleuse. Il arriva aux résultats que nous venons de dire plus haut. En résumé, la loi s'applique aux gaz permanents d'une manière satisfaisante dans la pratique : pour les gaz facilement liquéfiables, elle ne s'applique pas. Il semble résulter des expériences que, pour un gaz donné, la loi de Mariotte n'est vraie qu'à une seule température : pour l'air, l'oxygène, l'azote, cette température est proche de la température ordinaire; pour l'acide sulfureux, l'acide carbonique, elle est bien au-dessus de la température ordinaire, et bien au-dessous, au contraire, pour l'hydrogène. L'acide sulfureux et l'acide carbonique surchauffés, l'hydrogène très-refroidi, vérifieraient la loi de Mariotte.

Expression analytique : Soit une masse de gaz de poids P, de volume V, de pression H, elle prend le volume V′ sous la prossion H′. La loi nous apprend que (1) $\frac{V'}{V} = \frac{H}{H'}$, ou $VH = c^{te}$. Mais si D et D′ sont les densités du gaz, dans les deux cas, on a

$$P = VD = V'D';$$

donc

$$\frac{V'}{V} = \frac{D}{D'}$$

par suite (1), devient

(2)

$$\frac{D}{D'} = \frac{H}{H'}.$$

Donc, autre énoncé de la loi : A une même température, les densités d'une masse de gaz varient proportionnellement aux pressions qu'elle supporte.

Mélange des gaz. — Dans un espace de volume V, nous introduisons un gaz de volume v à la pression h, il y prendra une pression x égale à $\frac{vh}{V}$. Si nous y introduisons ensuite d'autres gaz de volumes v_1, v_2, v_3..., et de pressions h_1, h_2, h_3..., ils se répandront chacun dans le volume total, comme si les autres n'existaient pas, et donneront lieu à des pressions partielles y. z. u... égales à

$$\frac{v_1h_1}{V}, \quad \frac{v_2h_2}{V}, \quad \frac{v_3h_3}{V};$$

de sorte que la pression finale H sera :

$$H = \frac{vh}{V} + \frac{v_1h_1}{V} + \frac{v_3h_3}{V} = \frac{vh + v_1h_1 + v_2h_2 + v_3h_3...}{V}.$$

Ceci est facile à vérifier par l'expérience, et on donne à la loi l'énoncé suivant : Dans un mélange de plusieurs gaz qui n'agissent pas chimiquement l'un sur l'autre, la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques qu'aurait chaque gaz, s'il occupait seul le volume total du mélange.

Mesure des hauteurs par le baromètre. — Nous empruntons au cours de Routes, professé par M. l'ingénieur en chef, Baron, à l'École des ponts et chaussées, le paragraphe suivant : « Il était naturel d'employer le baromètre pour la mesure des hauteurs. Mais il était clair, *a priori*, que les causes qui influent sur le phénomène sont nombreuses et de natures diverses. Il a donc fallu composer une formule qui tînt compte, d'une manière suffisamment exacte, de toutes les circonstances capables d'influer sur le résultat. Laplace, en donnant cette formule, a fait du baromètre un instrument de nivellement.

« Il est inutile de rapporter ici textuellement le chapitre, assez court d'ailleurs, que cet illustre géomètre a consacré, dans le quatrième livre de la *Mécanique céleste*, à la mesure des hauteurs par le baromètre; ses calculs et diverses expériences l'ont conduit à la formule suivante :

$$Z = 18336^m \left\{1 + 0{,}002845 . \operatorname{Cos} 2\psi\right\} . \left\{1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right\} \left\{\left(\frac{1+Z}{a}\right) . \log \frac{h}{h'} + \frac{Z}{a} . 0{,}868589\right\}$$

dans laquelle h représente la hauteur du mercure, et t la température de l'air à la station inférieure; h' et t' les quantités analogues à la station supérieure; Ψ, une moyenne entre les latitudes de ces stations; a, la distance au centre de la terre de la station inférieure; z, la différence de niveau des deux stations.

« Depuis, on a fait entrer dans cette formule, d'une manière explicite, la correction relative aux variations de température du baromètre, et on y a apporté d'autres légères modifications ou simplifications de forme, dans le but d'en rendre l'application immédiate plus commode. Quelques mots suffiront pour rendre compte de ces changements.

« 1° Pour corriger rigoureusement l'erreur résultant de la différence de température des colonnes barométriques aux deux stations, il faudrait ramener par le calcul des hauteurs de ces colonnes à ce qu'elles devraient être, en partant, pour l'une et pour l'autre, du volume du mercure à 0°. On se borne à multiplier la hauteur h', à laquelle correspond presque toujours la plus petite température, par $[1 + k\,(T - T')]$, T et T' désignant les températures des baromètres aux stations inférieure et supérieure, et k la différence entre le coefficient de dilatation du mercure dans le verre et celui du laiton de l'échelle du baromètre; cette différence ayant pour valeur $0{,}00016124 = \frac{1}{6200}$, la correction se réduit à remplacer h' par $h'\left(1 + \frac{T - T'}{6200}\right)$.

« 2° Au lieu de laisser subsister dans la formule les termes $\left(1 + \frac{z}{a}\right)$ et $\frac{z}{a}\,0{,}868589$, introduits par la correction relative à la variation que subit l'intensité de la pesanteur, selon que, sur la même verticale, on se trouve plus ou moins élevé dans l'atmosphère, on les a supprimés et remplacés par une légère augmentation du coefficient numérique 18336. On a reconnu qu'on tenait très-suffisamment compte de la variation de la pesanteur pour les différences qu'elle produit dans le poids des colonnes atmosphériques, comme dans les poids et les hauteurs des colonnes barométriques, en remplaçant le coefficient numérique 18336 par le coefficient 18393.

« En conséquence de ces deux modifications, la formule a pu être écrite sous la forme suivante :

$$Z = 18370\left(1 + 0{,}002845\,\mathrm{Cos.}\,2\psi\right)\left(1 + 2\,\frac{t + t'}{1000}\right)\left\{\log h - \log h'\left[1 + \frac{T - T'}{6200}\right]\right\}$$

Quand on opère sous des latitudes qui ne diffèrent que de quelques degrés de la latitude moyenne, on néglige le facteur $1 + 0002845$ cos. 2Ψ.

« Cette formule est assez compliquée, et son emploi serait pénible, s'il fallait en calculer directement tous les termes dans chaque cas particulier : aussi a-t-on dressé des tables qui abrégent et facilitent beaucoup les calculs. M. Oltmanns a dressé, le premier, ces tables; depuis quelques années on en a étendu les limites, en profitant, en outre, de quelques déterminations nouvelles : elles sont insérées dans tous les annuaires du bureau des longitudes, et on ne croit pas nécessaire de les reproduire ici.

« A défaut de tables, on pourra calculer les différences de niveau par une formule extrêmement simple, facile à retenir, à laquelle M. Babinet a ramené la formule primitive : c'est la suivante :

$$Z = 32\left(500 + t + t'\right)\frac{h - h'}{h + h'}$$

dans laquelle t, t', h, h', ont les mêmes significations que ci-dessus : on suppose, toutefois, que les hauteurs h et h' ont été ramenés à la même température ; en d'autres termes, que la hauteur de la colonne barométrique à la station supérieure a été multipliée par $1 + \frac{T - T'}{6200}$.

« Cette formule approchée donne des résultats qui diffèrent de 5m. au plus de ceux auxquels conduirait la formule exacte pour des différences de niveau n'excédant pas 2,000 mètres.

« Il convient d'ajouter à ce qui précède quelques explications sur la manière dont on procède aux opérations sur le terrain.

« Une opération est toujours faite par deux observateurs. Chacun d'eux doit être muni d'un baromètre et d'un thermomètre.

« Avant de commencer l'opération, il faut comparer la marche des deux baromètres dans le même lieu, afin de s'assurer qu'ils donnent des résultats identiques. S'il n'en était pas ainsi, on ne pourrait les employer qu'à la condition de corriger les observations d'après les résultats de cette épreuve préalable.

« Les instruments ainsi vérifiés, l'un des observateurs se place à la station inférieure, celle à laquelle on veut comparer les hauteurs des autres stations. L'autre observateur va successivement se placer à ces stations.

« Le premier observateur doit inscrire de dix minutes en dix minutes la hauteur de la colonne du baromètre, les degrés indiqués par le thermomètre fixé à l'instrument et le thermomètre libre, afin d'avoir des observations faites à peu près simultanément avec les opérations des autres stations.

« L'observateur qui occupe successivement les stations note exactement à chacune d'elles les résultats que lui donne chaque instrument et l'heure à laquelle les résultats sont pris.

« Les carnets qui servent à chacun des observateurs doivent donc contenir plusieurs colonnes ; la première indique la station ; la seconde, l'heure de l'observation ; la troisième, la hauteur de la colonne barométrique ; la quatrième, la hauteur du thermomètre accolé au baromètre ; la cinquième, la hauteur du thermomètre libre. On note avec soin dans une dernière colonne, les circonstances atmosphériques qui se sont produites. Toutes les observations faites, on y applique la formule et on obtient les différences de hauteur cherchées. Pour avoir quelque confiance dans les résultats ainsi obtenus, il faut avoir la moyenne d'au moins cinq ou six observations faites à la même heure et à des jours différents ; il faut se garder d'opérer en temps d'orage ou de grands vents. Il faut autant que possible, n'opérer jamais qu'au milieu de la journée. Il est indispensable enfin de maintenir toujours les instruments à l'ombre. Les explications qui ont été données ci-dessus sur les causes diverses et nombreuses qui peuvent influer sur le résultat suffiront pour faire comprendre que le résultat renferme toujours un peu d'incertitude.

« En résumé, on trouve des différences qui peuvent atteindre 4 ou 5 mètres ; mais, pour les opérations auxquelles le baromètre est employé, cette approximation est presque toujours suffisante, et cet instrument peut rendre de véritables services dans les régions montagneuses où les nivellements ordinaires exigeraient un temps et des peines énormes, dans les cas fort rares où ils ne seraient pas absolument impraticables. »

Aérostats. — « La découverte des aérostats est l'une des inventions qui ont le plus fixé l'admiration du public, et bien que les années qui se sont écoulées depuis n'aient pas justifié toutes les espérances qu'elle avait fait naître, on ne

peut cependant s'empêcher de la considérer comme l'une des plus extraordinaires des temps modernes. C'est aux frères Montgolfier que nous devons cette merveilleuse découverte. Ils avaient annoncé qu'une grande machine de leur invention serait capable de parcourir l'atmosphère ; l'expérience en fut tentée à Annonay, le 5 juin 1783, en présence des états généraux et d'un concours immense de peuple ; c'est alors que l'on vit en effet un spectacle nouveau sur la terre, et bien digne d'exciter l'enthousiasme : un globe immense qui s'élevait majestueusement dans les airs, et qui semblait s'y soutenir par quelque puissance invisible. Cette espèce de prodige est cependant bien facile à comprendre.

La *montgolfière* (c'est le nom qu'ont reçu les appareils de cette nature, d'après celui de leurs inventeurs) se compose d'un globe de papier verni ou de taffetas qui porte à sa partie inférieure une ouverture de quelques pieds carrés. Au-dessous de cette ouverture et à quelque distance, est suspendu un panier léger, en fil de métal, contenant un corps combustible, soit de la paille hachée, soit de la laine ou du papier. Ce combustible étant enflammé, l'air chaud qui l'environne monte de lui-même, pénètre dans le globe et en remplit bientôt toute la capacité. A volume égal, l'air chaud pèse moins que l'air froid ; ainsi le poids du globe est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, et il doit s'élever par l'excès d'énergie de la poussée du fluide. Il s'élève, emportant avec lui le combustible enflammé qui produit sa puissance ascensionnelle, et, pour qu'il s'arrête, il faut qu'il arrive dans des couches d'air assez raréfiées pour que la différence des poids de l'air froid déplacé et de l'air chaud intérieur, soit justement égale aux poids réunis de l'enveloppe, du panier et du combustible qu'il contient.

Pilâtre des Rosiers et le marquis d'Arlandes osèrent les premiers monter dans une nacelle suspendue à une montgolfière et voyager librement dans l'atmosphère, malgré l'immense danger qui les attendait, dans le cas où le feu, qu'il était nécessaire d'entretenir sous le ballon pour maintenir la dilatation de l'air intérieur, viendrait à gagner l'enveloppe et à l'incendier au milieu des airs. Un physicien célèbre, Charles, jeune alors et professeur à Paris, eut l'heureuse idée de remplacer l'air chaud par le gaz hydrogène, dont Cavendish avait fait connaître l'extrême légèreté dès 1766. C'était supprimer l'emploi si dangereux du feu ; aussi tous les ballons construits depuis cette époque, l'ont-ils toujours été sur ce principe.

Charles fit construire un ballon de 500 mètres cubes ; et, pour montrer la confiance que devait inspirer sa découverte, il entreprit avec Robert ce fameux voyage dans lequel il fut porté en quelques minutes à la hauteur de 900 à 1,000 mètres, et parcourut, dans cette région de l'atmosphère, plus de neuf lieues dans l'espace de deux heures. C'est au milieu des Tuileries que Charles fit son ascension ; toute la population de Paris était en mouvement ; les places publiques, les sommets des édifices, et tous les lieux élevés étaient couverts de spectateurs ; un coup de canon fut le signal du départ, et bientôt on vit monter le ballon, comme un météore qui s'élève sur l'horizon ; au plus haut des airs, on distinguait encore les banderoles flottantes, éclairées par le soleil, et les navigateurs tranquilles qui saluaient la terre. Jamais expérience de physique n'excita tant d'admiration et un tel concert d'applaudissements.

Le gaz hydrogène ne pesant que $\frac{1}{15}$ de l'air atmosphérique, on voit que la force ascensionnelle d'un ballon de grande dimension peut être assez considérable. Ainsi un ballon de 10 mètres de diamètre peut aisément, poids de l'enveloppe compris, avoir 500 kilogrammes de force ascensionnelle. Cette force sert à enlever avec l'aéronaute des sacs de sable, ce qui lui permet de partir avec une fai-

ble vitesse, et d'atteindre la hauteur qu'il désire en jetant une partie de son lest.

Une précaution essentielle est de ne pas gonfler l'aérostat lors du départ ; car à mesure qu'on s'élève, la pression de l'atmosphère diminuant, le gaz de l'aérostat se dilate et finirait par crever l'enveloppe si elle était tendue.

Fig. 51.

Pour descendre, l'aéronaute entr'ouvre une soupape placée à la partie supérieure du ballon et qu'il peut manœuvrer au moyen d'une corde. Le ballon perdant de sa force ascensionnelle, tombe, et par ce moyen combiné avec celui du lest, il devient possible de descendre sans danger. Les ballons sont certes une admirable invention, mais pourra-t-on jamais en tirer une utilité directe ?

Pour cela il faudrait avant tout pouvoir parvenir à les diriger, et c'est pour atteindre ce but que des milliers d'inventeurs proposent chaque jour des systèmes nouveaux. Dans l'état actuel de l'art une seule chance s'offre à l'aéronaute qui veut atteindre une région déterminée, chance très - rare et très-précaire.

On a remarqué depuis longtemps qu'il existe souvent, à des hauteurs diverses de l'atmosphère, des courants de direction différente ou même tout à fait opposée.

Quelquefois, au-dessus d'une région calme, il existe un vent très-sensible, ou bien inversement. L'aéronaute peut donc espérer de rencontrer assez fréquemment un vent convenable ; mais la manœuvre de monter ou descendre à volonté pour atteindre les régions où le courant est favorable, abrége essentiellement la durée du voyage, puisqu'elle exige, comme nous l'avons dit, soit une perte de lest pour gagner de la hauteur, soit une perte de gaz pour descendre, en diminuant ainsi la force ascensionnelle du ballon.

Le système qui se reproduit presque constamment consiste à produire le mouvement par des ailes analogues à celles des oiseaux, dont l'exemple a toujours excité la jalousie de l'homme, comme le prouve la tradition d'Icare.

M. Navier, cherchant à étudier cette question au point de vue, négligé par les inventeurs, de la force nécessaire pour produire les effets indiqués, est arrivé à cette conclusion : que l'homme ne dispose pas en chaque instant, toute proportion gardée, de plus de la quatre-vingt-douzième partie de celle que l'oiseau déploie quand il se soutient dans l'air.

Il n'y a donc pas lieu, comme M. Hutton l'a fait il y a quelques années, à chercher à se diriger dans l'air au moyen d'un appareil analogue à celui des oiseaux, en employant la force motrice de la vapeur, car, à poids égal, l'homme est encore le moteur qui produit le plus grand travail continu. Il serait plus rationnel d'essayer un appareil analogue à celui du poisson ; celui-ci se soutient dans l'eau à l'aide de sa vessie natatoire, et se dirige avec ses nageoires et sa queue qui lui

sert de gouvernail. Un ballon occupant l'intérieur d'une carcasse, à laquelle seraient fixés un gouvernail et de grandes hélices propulsives, soutiendrait en l'air l'appareil, qu'il ne s'agirait plus que de diriger. Mais alors la force humaine ne serait pas susceptible de développer d'une manière continue l'effort nécessaire pour faire avancer le ballon dans une direction opposée à celle du moindre vent. On ne pourrait pas encore dans ce cas employer de machine à vapeur, de crainte d'incendier le ballon ou le gaz qu'il renferme, indépendamment du poids trop considérable de ce moteur par rapport à son travail. On doit s'en tenir à cette conclusion de M. Navier dans son rapport déjà cité : « Nous pensons que la création d'un art de la navigation aérienne, dont les résultats pourraient être utiles et présenter autre chose qu'un spectacle, est subordonnée à la découverte d'un nouveau moteur dont l'action comporterait un appareil beaucoup moins pesant que ceux qu'exigent les moteurs que nous connaissons aujourd'hui. »

(Extrait du *Dictionnaire des arts et manufactures*, publié par M. Charles Laboulaye.)

Manomètres ou appareils mesurant la pression. — 1° *Manomètre à air libre.* — C'est le premier appareil qui nous a servi à démontrer la loi de Mariotte. Par le robinet I, le gaz du réservoir exerce sa pression sur le mercure de la branche T′ qui descend pendant que le mercure de l'autre branche T monte et indique la pression. La figure montre en détail la disposition du robinet R à trois voies, ce qui permet, soit de faire communiquer les deux tubes, soit de les vider tous les deux à la fois, ou tous les deux séparément. Appareil encombrant, coûteux et agité de chocs perpétuels.

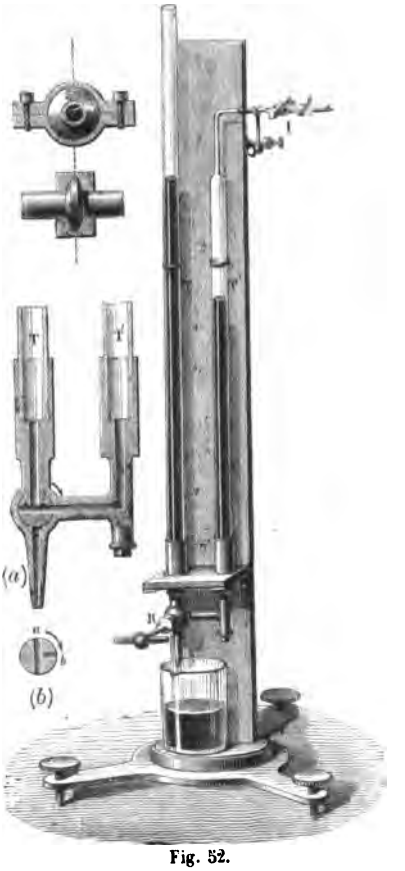


Fig. 52.

2° *Manomètre à air comprimé* (*fig.* 53). — Le gaz arrive par le robinet R dans la cloche C, y comprime le mercure de la cuvette et par son intermédiaire le gaz du tube ; ce gaz confiné diminue de volume, et le tube indique les pressions par sa graduation. On pourrait faire cette graduation par le calcul en prenant pour base la loi de Mariotte ; mais il est beaucoup plus exact de le graduer par comparaison avec un manomètre à air libre.

L'inconvénient de l'appareil est que pour les fortes pressions, c'est-à-dire les plus nécessaires à connaître, la variation du volume du gaz est très-faible et la lecture manque d'exactitude. La forme conique donnée au tube dans la seconde figure est préférable, car elle permet de donner même longueur aux divisions correspondant à une atmosphère (*fig.* 54).

3° *Manomètre métallique de Bourdon.* — Même principe que pour le baromètre. Le ressort creux n'est pas vide, mais la vapeur y pénètre par le robinet R,

et ce ressort tend à se dérouler quand la pression augmente, à se replier si la pression diminue. Ces mouvements se transmettent à l'aiguille par un levier.

Fig. 53.

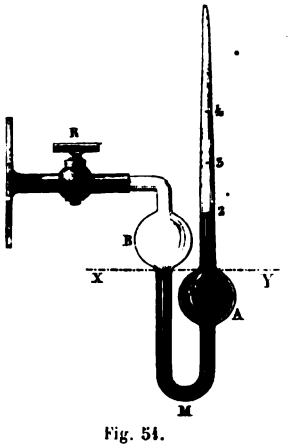


Fig. 54.

Fig. 55.

Machine pneumatique. — Nous avons vu que le vide parfait existait dans la chambre barométrique. Mais il est bien évident que ce n'est pas un moyen simple et commode; on recourt pour faire le vide à la machine pneumatique, dont le principe est dû à Otto von Guericke, bourgmestre de Magdebourg.

La cloche ou récipient M communique par le conduit T avec le dessous X du piston du corps de pompe C, le robinet R étant ouvert. Le conduit T, à son orifice dans le corps de pompe, est recouvert d'une soupape s'ouvrant de bas en haut; une autre soupape X s'ouvrant aussi de bas en haut, ferme l'orifice d'un conduit qui traverse le piston et débouche dans l'atmosphère. Le piston étant au bas de sa course, soulevons-le le vide tend à se faire au-dessous de lui, mais l'air du récipient presse la soupape du bas et vient se dilater dans le corps de pompe; la soupape X ne peut s'ouvrir, pressée comme elle l'est par l'atmosphère. Arrivé en haut de sa course, le piston redescend, comprime l'air au-dessous de lui jusqu'à ce que sa pression égale celle de l'atmosphère. La soupape du bas s'est fermée dès que la descente commence, la soupape X s'ouvre quand la pression intérieure dépasse une atmosphère. Une partie de l'air est expulsée du récipient, et il en est de même aux autres coups de piston. Une abondante quantité d'huile permet au piston de glisser à frottement hermétique dans l'intérieur du cylindre.

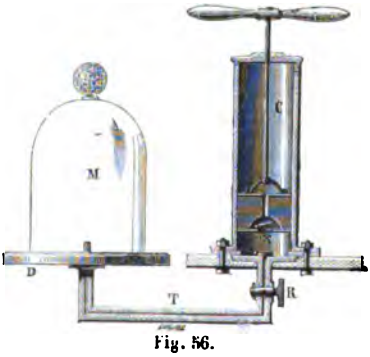


Fig. 56.

Soit R la capacité du récipient, P celle du corps de pompe, H la pression atmosphérique; au premier coup, le volume d'air R, à la pression H, se répand

dans la capacité R + P, et la tension du gaz confiné devient $H\frac{R}{R+P} = t_1$; au deuxième coup, le volume R, à la pression t_1, se répand dans le volume R + P et prend une tension $\frac{R}{R+P}t_1 = t_2 = H\left(\frac{R}{R+P}\right)^2$, et au $n^{ième}$ coup, la tension de l'air confiné devient $t_n = H\left(\frac{R}{R+P}\right)^n$. On voit que, la fraction $\frac{R}{R+P}$ étant plus petite que l'unité, la tension de l'air comprimé diminue de plus en plus et tend vers zéro, sans jamais l'atteindre. Plus le corps de pompe est grand par rapport au récipient, plus la tension diminue rapidement.

Dans la pratique il y a toujours un espace nuisible où l'air se condense quand le piston est au bas de sa course ; les rugosités des surfaces empêchent un contact parfait. Il est vrai que, pour le diminuer, on remplace la soupape du bas par un orifice conique fermé exactement par un tronc de cône que manœuvre une tige

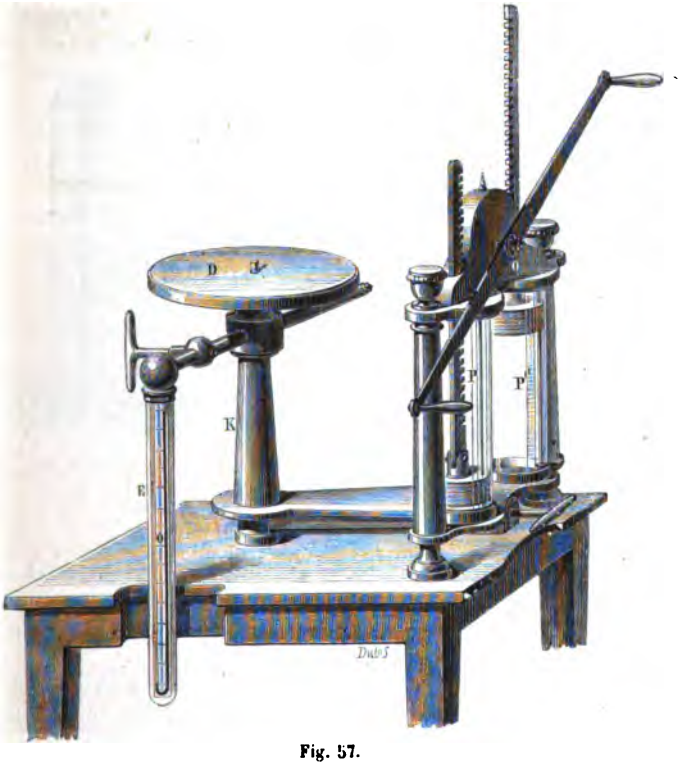


Fig. 57.

métallique traversant le piston à frottement dur. S'il n'y avait qu'un corps de pompe, la manœuvre deviendrait bien vite impossible : vu la pression atmosphérique qui s'exerce sur la face supérieure du piston, il faudrait pour le soulever une force considérable. On a donc une double manivelle dont l'axe *o* porte une roue dentée qui engrène avec les tiges à crémaillère de deux pistons : l'un monte pendant que l'autre descend, et la pression atmosphérique est équilibrée.

Nous donnons ci-contre le dessin de la soupape du piston. Nous donnons aussi

le dessin du robinet qui est percé d'un conduit *ab* faisant communiquer corps de pompe et récipient, et qui possède un autre conduit $\gamma\gamma'$ fermé par un bouchon LL′ et situé dans une direction normale à celle de *ab*. Ce dernier conduit débouche avec l'atmosphère, et sert à faire rentrer dans le récipient l'air extérieur ou bien encore à isoler complétement le récipient du corps de pompe, afin d'empêcher les fuites. La figure 60 montre ce conduit dans ces deux positions.

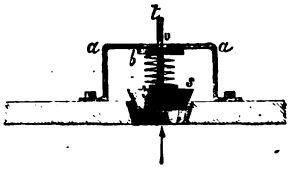


Fig. 58.

Une éprouvette E, qui est un véritable baromètre, sert à apprécier le degré de raréfaction : si le vide était aussi parfait du côté de la branche ouverte, c'est-à-dire dans le récipient, que du côté de la chambre barométrique, les deux ménis-

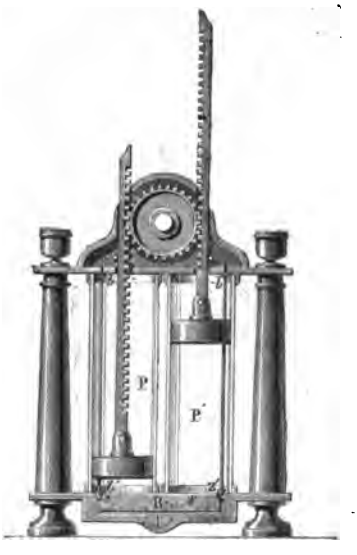


Fig. 59.

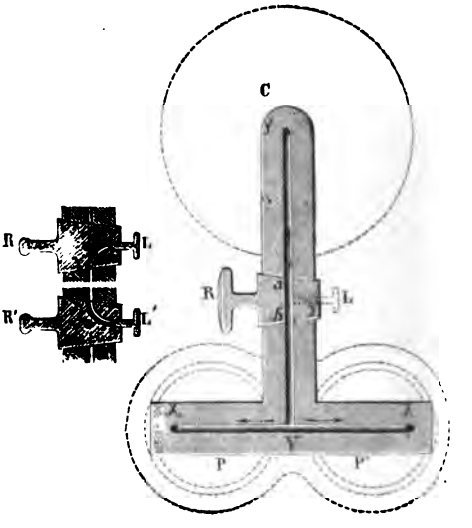


Fig. 60.

ques seraient au même niveau, au zéro de l'éprouvette. On comprend facilement ce que signifie faire le vide à un, à deux, à trois millimètres de mercure.

La machine pneumatique permet de démontrer les faits suivants : la combustion, la respiration, la fermentation s'éteignent dans le vide.

Lorsqu'on fait le vide sur une portion de la peau, la pression des liquides intérieurs n'est plus balancée, et le sang jaillit; ce phénomène se produit chez les personnes qui montent à une grande hauteur dans l'atmosphère, où l'air est très-raréfié.

Machine de compression. — Disposition analogue à celle de la machine précédente; le jeu des soupapes est seulement renversé, elles s'ouvrent de haut en bas (*fig.* 62). — On soulève le piston, la soupape Z est ouverte et l'air extérieur pénètre dans le corps de pompe; le piston redescend, l'air se comprime, presse la soupape Z qu'il ferme et la soupape Z′ qu'il ouvre, et pénètre dans le récipient. S'il existe sous le piston un espace nuisible (*n*), que P soit le volume du corps de pompe, et H la pression atmosphérique; la limite x de compression sera la

tension telle, que sous cette tension un volume P à la pression H n'occupe plus qu'un volume n, donc la tension limite $x = \frac{n}{P}H$.

Fig. 61.

Pompe à main ordinaire. — L'air arrive par le conduit T, traverse la soupape Z pendant que le piston monte, et, quand le piston descend, la soupape Z se ferme, Z' s'ouvre et l'air va dans le récipient par le conduit T'.

Nous parlerons des pompes, du siphon et du gazomètre en mécanique et en chimie.

Poids spécifiques des gaz. — Le poids spécifique d'un gaz est le rapport du poids d'un volume donné de ce gaz au poids d'un égal volume d'air sec à la température 0° et sous la pression 0m,76. Ce rapport étant connu, sachant de plus que le poids d'un litre d'air est 1gr,293 et que, par suite, la densité de l'air par rapport à l'eau est 0,001293, on aura le poids spécifique du gaz par rapport à l'eau en multipliant par 0,001293 le poids spécifique de ce gaz par rapport à l'air.

La densité d'un gaz est en général le rapport du poids d'un volume de ce gaz au poids d'un égal volume d'air sec pris dans les mêmes circonstances. Si la loi de Mariotte était vraie, la densité serait constante et égale au poids spécifique, mais cela n'est pas et la densité des gaz est variable.

En principe, la détermination des poids spécifiques est simple ; il suffit de prendre un ballon plein d'air à la pression H, soit P son poids, d'y faire le vide partiel jusqu'à la pression h, soit p son poids. La différence $P - p$ donne le poids du gaz qui remplirait

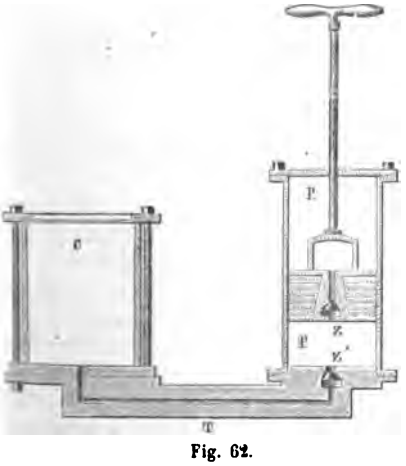


Fig. 62.

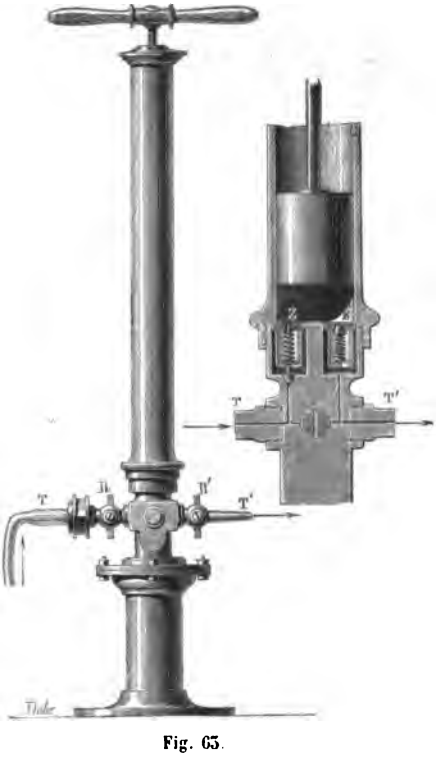


Fig. 63.

le ballon à la pression $H - h$ (c'est ce qui résulte de la loi du mélange des gaz). Connaissant la température et les coefficients de dilatation, on déduit

de ce poids celui A de l'air qui remplirait le ballon à 0° et sous la pression $0^m,76$. On répète la même opération avec le gaz donné, et l'on trouve un poids B ; le poids spécifique est $\frac{B}{A}$. Mais il y a de très-grandes difficultés à connaître exactement les coefficients de dilatation et les températures au moment des pesées : il y a là bien des causes d'erreur.

Méthode de M. Regnault. — M. Regnault prend deux ballons de même volume et de même poids, en un mot, exactement pareils. L'un d'eux est hermétiquement fermé et vide ; tous deux sont suspendus sous les plateaux de la balance hydrostatique. Le ballon vide fait équilibre à l'autre ballon, et on n'a pas besoin de le tarer ; l'excès de poids est dû uniquement au poids du gaz contenu dans l'autre ballon, et il est alors facile de trouver ce poids. Le ballon où l'on pèse le gaz est plongé d'abord dans un vase de zinc entouré de glace, de sorte que ce que l'on pèse ensuite est le poids d'un volume de gaz pris à 0°. Les influences atmosphériques, pendant la pesée, affectent également les deux ballons, et la seule correction à faire est celle des pressions.

Pour la densité des gaz qui attaquent les montures en laiton, tels que le chlore, on se sert de grands flacons bouchés à l'émeri.

	Poids spécifiques.		Poids spécifiques.
Hydrogène	0,0692	Oxygène	1,105
Gaz ammoniac	0,597	Acide chlorhydrique	1,245
Oxyde de carbone	0,967	Acide carbonique	1,529
Azote	0,972	Chlore	2,44
Air atmosphérique	1,000		

CHAPITRE III

DE LA CHALEUR

La chaleur. — En physique, on appelle chaleur la cause qui produit les sensations du chaud et du froid. Ces sensations ont un caractère purement relatif, et dans certaines conditions une source de chaleur peut agir comme une source de

Fig. 64.

froid et réciproquement. La chaleur se manifeste encore en produisant dans les corps des changements de volume, des changements de force élastique, et des changements d'état. Exemples :

Changements de volume ou de dimensions. Une barre T chauffée à l'alcool s'allonge et pousse le levier coudé *b*OA. Un liquide contenu dans un ballon B et chauffé au bain-marie se dilate et monte de *m'* en *m* (il y a d'abord un abaissement à cause de la dilatation du vase qui se fait avant celle du liquide). Le gaz contenu dans une boule de verre se dilate par la chaleur de la main et chasse devant lui l'index de mercure (*a*).

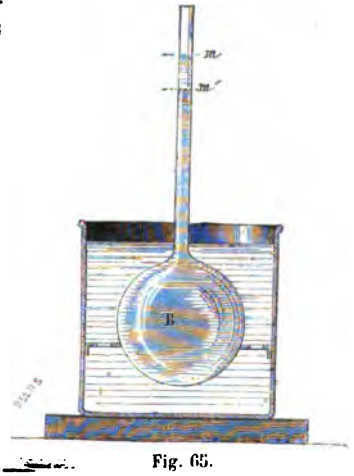


Fig. 65.

Température et thermomètre. — Nous empruntons au cours de physique que le regretté M. Verdet professait à l'École polytechnique les considérations suivantes sur les températures et les thermomètres : « On peut remarquer d'une manière générale que, si deux corps ou deux systèmes de corps sont mis en rapport, l'un d'eux fonctionne re-

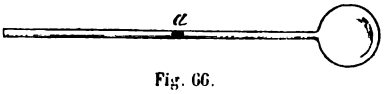


Fig. 66.

lativement à l'autre comme une source de chaleur et qu'il éprouve lui-même les effets résultant de l'application d'une source de froid. Cette période de réaction réciproque des deux systèmes a pour conséquence finale un état d'équilibre qui persiste indéfiniment si aucune cause extérieure ne vient le troubler (cette dernière condition impossible à réaliser pratiquement est toujours théoriquement concevable). On dit alors que les deux systèmes *sont en équilibre de température* ou que *leurs températures sont égales*. Il peut arriver que cet état d'équilibre se réalise dès le premier instant et sans qu'aucune modification survienne dans l'état d'aucun des deux systèmes. On dit que les deux systèmes sont initialement à *des températures différentes*, et celui de ces deux systèmes qui fonctionne par rapport à l'autre comme une source de chaleur (qui détermine dans l'autre système des effets de dilatation, fusion ou vaporisation) est dit avoir eu primitivement *la température la plus élevée*.

Deux faits généraux établis par l'expérience justifient l'emploi de ces locutions :

Premièrement, si deux systèmes A et B sont respectivement à la même température qu'un troisième système C, lorsqu'on les mettra en relation l'un avec l'autre, ils se trouveront immédiatement en équilibre. En d'autres termes, deux températures égales à un troisième sont égales entre elles.

En second lieu, si de trois systèmes A, B, C, le deuxième est à une température plus élevée que le premier, et le troisième à une température plus élevée que le deuxième, l'expérience montre que le troisième est à une température plus élevée que le premier. De plus, si, par l'action d'une source de chaleur, on modifie l'état du système A, de façon à l'amener à se trouver en équilibre de température avec le système C, il passera toujours par une suite d'états telle qu'à un certain moment, il se trouvera en équilibre avec le système B. Cette circonstance permet de dire que B est à une température *intermédiaire* entre les températures de A et de C.

Soit un nombre quelconque de systèmes respectivement en équilibre. En ayant égard à ce qui vient d'être dit, il sera possible de les classer dans un ordre tel, qu'un système quelconque soit à une température plus élevée que tous ceux qui le précèdent, et à une température moins élevée que tous ceux qui le suivent. L'ordre ainsi établi, que nous représentons par :

$$A, B, C, \ldots\ldots\ldots Z,$$

sera évidemment unique, et un système quelconque, ne pourra passer à l'état d'un système suivant qu'en traversant les états de tous les systèmes intermédiaires.

Supposons que dans la constitution de tous les systèmes A, B, C,... etc., on ait fait entrer un même corps m; dans chaque système, ce corps aura un volume particulier qu'il suffira de connaître pour caractériser d'une manière précise l'état du système relativement à tous les autres. Il suit en effet des définitions précédentes que si, dans deux systèmes, le corps m a même volume, ces systèmes sont à des températures égales, et que le système où le volume de m est le plus grand est à la température la plus élevée. Un corps commun à divers systèmes en équilibre et dont le volume peut être mesuré commodément est ce qu'on nomme *un thermomètre*.

Convenons maintenant d'appeler *température* d'un système, soit l'expression numérique du volume que possède le thermomètre, soit une fonction quelconque de cette expression ; une telle convention, qui sera d'une grande commodité pour la désignation des états divers que traverse un système soumis à l'action de

la chaleur sera entièrement d'accord avec les définitions données plus haut de l'égalité et de l'inégalité des températures en sorte qu'il n'y aura à la faire que des avantages.

Le mot *température*, lorsqu'il est employé isolément n'a donc aucune signification mystérieuse, que les progrès ultérieurs de la science devraient éclaircir, et qu'on devrait aujourd'hui se contenter de sentir d'une manière plus ou moins vague. Il désigne simplement un *nombre* qui satisfait aux conditions suivantes : deux systèmes en équilibre où ce nombre a la même valeur demeurent en équilibre lorsqu'on les mettra en rapport l'un avec l'autre ; deux systèmes où il a des valeurs différentes se modifieront réciproquement, et celui auquel correspond le plus grand nombre fonctionnera relativement à l'autre comme source de chaleur. Il résulte de ce qui précède qu'on peut trouver une série de nombres jouissant de ces propriétés et qu'on en peut même trouver une infinité, selon la diversité des conventions qu'on voudra faire. Les conventions suivantes, qui ne sont peut-être pas les plus avantageuses possibles, ont été universellement adoptées.

1° On appelle *température zéro* la température de tout système où le thermomètre prend un volume particulier défini arbitrairement.

2° On prend pour expression de la température un nombre proportionnel au changement relatif qu'éprouvera le volume du thermomètre en passant de l'état défini par la température zéro à un autre état quelconque. Ce nombre est positif ou négatif suivant que le changement de volume considéré est une dilatation ou une contraction. Il y a d'ailleurs autant d'échelles thermométriques qu'on attribue de valeurs diverses au coefficient par lequel est exprimé la proportionnalité entre la température et les variations de volume du thermomètre.

Les plus anciens thermomètres, ceux de Galilée et des académiciens de Florence, paraissent avoir été entièrement conformes à ces conventions. C'étaient de petits thermomètres à alcool, de dimensions exactement identiques, dont la tige était divisée exactement de la même façon, et où d'ailleurs la position du zéro était entièrement arbitraire. Newton paraît avoir le premier défini le zéro par un phénomène physique, facile à reproduire dans des conditions identiques, la fusion de la glace ; mais son degré était encore une fraction du volume à zéro défini numériquement. Fahrenheit a remplacé cette définition numérique par l'introduction d'un deuxième point fixe qui caractérise l'ébullition de l'eau sous une pression déterminée, la pression de 760 millimètres. Les deux modes de définir l'échelle thermométrique sont au fond identiques ; mais le second est pratiquement beaucoup plus commode que le premier.

Échelle centigrade. — Le degré centigrade est l'élévation de température qui produit une variation de volume du thermomètre égale à la centième partie de la variation qui a lieu lorsque le thermomètre passe de la température de la fusion de la glace à la température d'ébullition de l'eau.

Cette définition n'a un sens tout à fait précis que si l'on fait connaître la matière du thermomètre ; car, si en vertu des conventions faites sur les points fixes, tous les thermomètres doivent s'accorder aux températures 0° et 100°, il n'y a *a priori* aucune raison pour qu'ils s'accordent dans les conditions différentes.

Échelle de Réaumur. — L'intervalle des deux points fixes est divisé en 80 parties égales.

Échelle de Fahrenheit. — L'intervalle des deux points fixes est divisé en 180 parties égales, mais le point de fusion de la glace correspond à la tempéra-

ture 32° au lieu de la température 0°, le point d'ébullition de l'eau correspond à la température 212°.

Presque tous les corps sont propres à servir de thermomètres. Des raisons de commodité pratique on fait adopter pendant longtemps l'usage à peu près exclusif du thermomètre à mercure. Des raisons d'une tout autre nature, parmi lesquelles on ne citera pour le moment que la permanence indéfinie de l'état physique de l'air atmosphérique, l'ont fait remplacer dans toutes les recherches scientifiques exactes par le thermomètre à air. De plus, on a substitué dans ce thermomètre l'observation des variations de force élastique à celle des variations de volume.

Thermomètre. — *Choix du corps thermométrique. Thermomètres solides.* — Deux échantillons différents d'un même corps solide n'ayant presque jamais les mêmes propriétés physiques, les thermomètres solides ne sont pas comparables entre eux ; ils peuvent cependant rendre des services comme *pyromètres* lorsqu'il s'agit d'apprécier pour les besoins de la pratique industrielle des températures très-élevées.

Thermomètres à liquides. — L'influence sensible de l'enveloppe solide ne permet pas de regarder comme absolument comparables les indications de divers thermomètres construits avec un même liquide et des enveloppes de nature différente; mais la commodité des thermomètres à liquide est telle, qu'on ne saurait en abandonner l'usage, même dans les recherches les plus précises ; il faut seulement que ces instruments aient été comparés avec un instrument étalon, qui est le thermomètre à air.

Thermomètres à gaz. La dilatation des gaz étant plus de 150 fois supérieure à la dilatation moyenne du verre, les variations de cette dernière dilatation ne peuvent exercer sur les indications d'un thermomètre à gaz qu'une influence inférieure aux erreurs inévitables des expériences ; les divers thermomètres construits avec un même gaz sont donc comparables.

Pyromètre de Wedgwood. — Plaque métallique portant deux rainures de largeur décroissante, dont l'une est la continuation de l'autre; on observe la division où s'arrête un petit cylindre d'argile, qui, avant d'avoir été chauffé, ne pénètre que jusqu'à une division initiale marquée 0°; et qui, en se contractant par la chaleur, peut pénétrer plus loin, la graduation est arbitraire, et l'instrument n'est qu'un indicateur grossier.

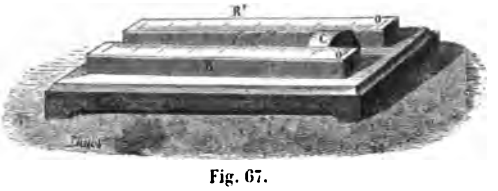


Fig. 67.

Thermomètres à liquide. — Ces instruments seraient comparables si l'on observait les volumes absolus des liquides. Si l'on n'observe que les volumes apparents, comme on le fait d'ordinaire, l'influence de l'enveloppe ne permet pas de regarder *a priori* comme comparables les indications d'instruments divers construits avec un même liquide renfermé dans des enveloppes dont on ne peut garantir l'identité. Néanmoins, la dilatation de l'enveloppe solide étant généralement une fraction assez petite de la dilatation du liquide, son influence est assez restreinte; d'ailleurs, il est facile de comparer ces instruments à l'un d'entre eux, ou mieux encore au thermomètre à air, pris pour étalon, et de donner ainsi un sens tout à fait précis à leurs indications.

Avantages évidents du thermomètre à mercure : étendue de sa course (de 40° à + 550° du thermomètre à air) ; purification facile du métal (distillation suivie de lavages à l'acide nitrique et à l'acide sulfurique).

Construction. — A l'une des extrémités d'un tube divisé en parties d'égale capacité, on souffle un réservoir cylindrique, ellipsoïdal ou sphérique ; à l'autre extrémité on soude ou on souffle une olive terminée par un tube effilé qui s'ouvre dans l'atmosphère ; on chauffe l'air du réservoir, on plonge le tube effilé dans du mercure chaud, et lorsque le refroidissement de l'air a déterminé l'ascension d'une certaine quantité de mercure, on fait tomber ce liquide dans le réservoir en retournant l'instrument et en lui donnant quelques secousses.

Fig. 68.

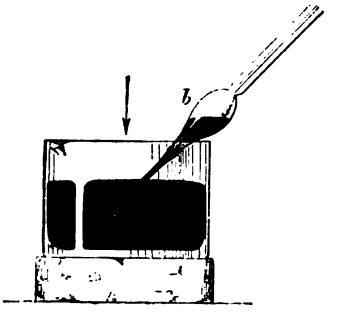


Fig. 69.

On réitère cette opération jusqu'à ce qu'il ne reste plus dans le réservoir qu'une faible quantité d'air, qu'on expulse définitivement par l'ébullition du mercure. On laisse refroidir, on plonge l'instrument pendant quelques instants dans la glace et dans l'eau bouillante, afin de connaître à peu près la position des points fixes, et si cette position ne paraît pas convenable, on introduit une nouvelle quantité de mercure ou on en fait sortir par l'action de la chaleur. On coupe le tube

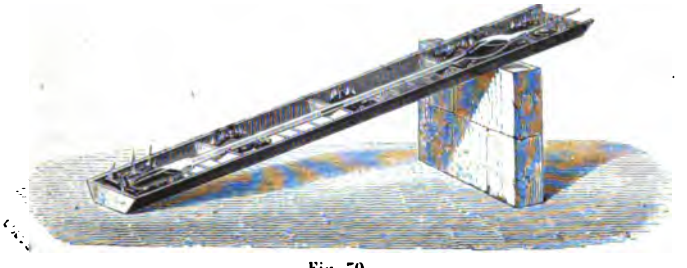


Fig. 70.

à la longueur voulue (déterminée par la course qu'on veut donner au thermomètre), et on le ferme à la lampe en ayant soin de laisser à l'extrémité de la tige une petite capacité où le mercure puisse s'accumuler sans briser le tube par sa dilatation, si dans une expérience on vient à dépasser la limite supérieure des températures auxquelles on veut employer l'instrument.

Il s'agit alors de déterminer les points fixes : le zéro du thermomètre centigrade est le point où s'arrête le mercure quand on laisse pendant un certain temps l'appareil plongé dans un vase rempli de glace concassée et qui est en fusion (*fig.* 71).

L'autre point fixe s'obtient en plaçant l'appareil dans l'étuve que représente la figure 72. La vapeur d'eau l'environne de toutes parts ; le vase est à double enveloppe, de façon à maintenir bien constante la température du cylindre intérieur. Au bout de quelque temps, le niveau de la colonne de mercure devient fixe, l'opération est alors terminée.

On marque 100° en ce point fixe, et l'on divise l'intervalle de 0° à 100° en cent parties égales.

Nous avons dit plus haut quelle était la graduation Réaumur et la graduation Fahrenheit.

Thermomètres à maxima et à minima. — 1° *De Bellani.* — Dans le vase A

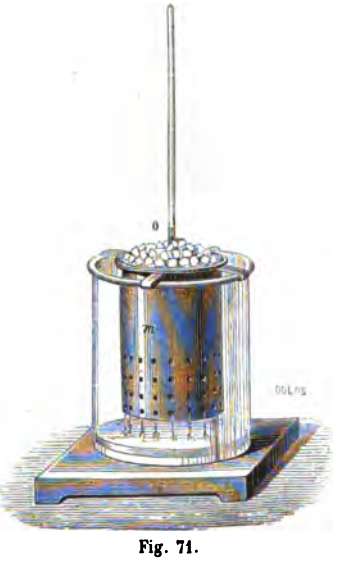


Fig. 71.

Fig. 72.

Fig. 73.

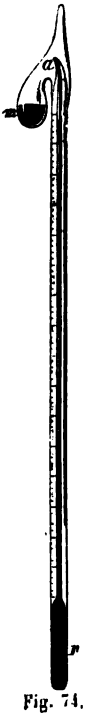


Fig. 74.

est de l'alcool qui se dilate ou se contracte et transmet ses mouvements à la colonne de mercure l'I. Sur chaque ménisque flotte un tube en verre rempli de mercure et prolongé par un fil de verre étiré : ce fil de verre est sinueux, s'arc-boute sur les parois du tube; il monte bien, mais ne peut descendre, de sorte qu'en I l'index s'arrêtera à la température maxima et en I′ à la température minima. La graduation est faite avec un thermomètre ordinaire (*fig.* 73).

2° *Thermomètre à maxima de Walferdin.* — A une haute température, le mercure se déverse par la pointe (*a*), dans l'ampoule *m*; on le retire, le mercure baisse dans le tube; alors on le chauffe à côté d'un thermomètre ordinaire; au moment où l'écoulement va recommencer en (*a*), le thermomètre ordinaire donne la température maxima à laquelle l'appareil de Walferdin a été soumis.

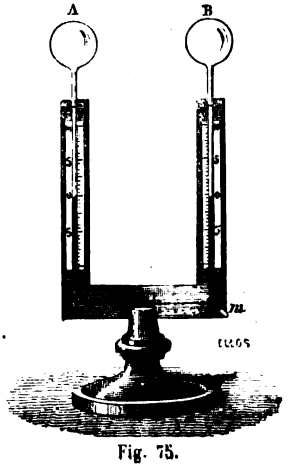


Fig. 75.

Thermomètre différentiel de Leslie. — De l'air est renfermé dans les boules A et B, et ces deux espaces sont séparés par une colonne d'acide sulfurique ; pour avoir la différence de température de deux enceintes voisines, on plonge une boule dans l'une, et l'autre boule dans l'autre. L'appareil a été gradué à l'avance, et le niveau du liquide

indique en degrés l'excès de la température d'une enceinte sur la température de l'autre.

Dilatation des corps. — Nous avons vu qu'une tige de métal chauffée s'allonge et pousse devant elle un petit levier qui permet de constater et de mesurer grossièrement l'allongement total ou dilatation linéaire.

On appelle K le coefficient de dilatation linéaire, c'est-à-dire la quantité dont varie l'unité de longueur du corps pour une variation de température de 1° centigrade. Ainsi une longueur l portée de o à t devient $l' = l\,(1+Kt)$, et la longueur l portée de t à t' devient $l'' = l'\,(1+K[t'-t])$.

Si on considère une surface, réduite à un carré de côté a, sa surface deviendra au lieu de a^2, $S' = a(1+K)\,a(1+K)$, pour un accroissement de 1°, ou $S' = a^2(1+2K+K^2)$, et comme K^2 est négligeable par rapport à 2K, $S' = a^2(1+2K) = S(1+2K)$.

Si on considère un volume représenté par un cube de côté a, le volume V deviendra pour un accroissement de 1° $V' = a^3(1+K)^3 = V(1+K)^3$, $V' = V(1+3K+3K^2+K^3)$, ou en négligeant K^2 et K^3 très-petits par rapport à K $V' = V(1+3K)$.

Ainsi le coefficient de dilatation de section est double, et le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire.

Formules générales :

$$V_o = \frac{V_t}{1+Kt} \qquad V_t = V_{t'}\left\{1+K(t'-t)\right\}$$

K est ici le coefficient de dilatation cubique.

$$V_o = \frac{V_t}{1+Kt} = \frac{V_{t'}}{1+Kt'} \text{ donc } \frac{V_t}{V_{t'}} = \frac{1+Kt}{1+Kt'} = \frac{D_{t'}}{D_t}.$$

Pour un gaz, le coefficient de dilatation cubique s'appelle α. On a :

$$V_{t'} = V_t \frac{1+Kt'}{1+Kt}.$$

Si les pressions correspondant aux volumes sont différentes et égales à H et H', on résumera les deux effets de la variation de température et de la variation de pression dans la formule :

$$V_{t'} = V_t \times \frac{H}{H'} \times \frac{1+Kt'}{1+Kt},$$

ou bien :

$$D_{t'} = D_t \frac{H'}{H} \times \frac{1+Kt}{1+Kt'}.$$

Mesure de la dilatation des solides. — Nous avons déjà vu le petit appareil qui permettrait à la rigueur de la mesurer. Voici maintenant l'appareil de Laplace et Lavoisier.

Une lame à éprouver est plongée dans un bain d'huile, et vient buter d'une

part à l'obstacle fixe FF'TT', d'autre part à la barre LL', qui communique à l'axe *oo'* et à la lunette VV', d'abord horizontale, un mouvement de rotation. Une mire

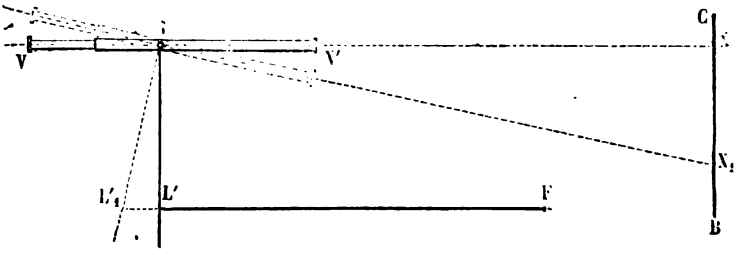


Fig. 76.

est placée à une grande distance dans l'axe de la lunette, et on peut lire la hauteur XX_1 correspondant à l'angle d'oscillation. On a évidemment : $\frac{L'L'_1}{LL'} = \frac{XX_1}{LX}$,

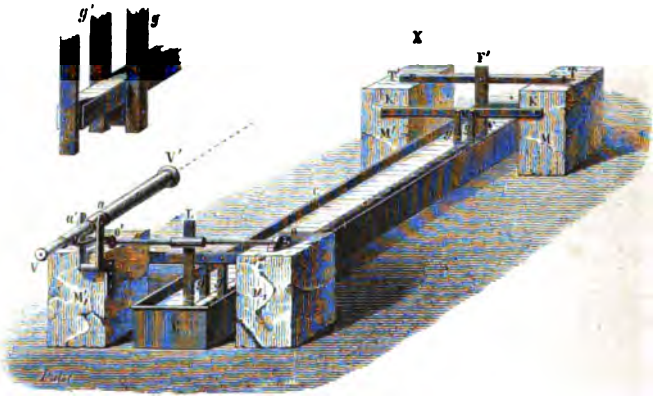


Fig. 77.

et là dedans il n'y a que $L'L'_1$ d'inconnu ; or, c'est l'accroissement de longueur qui, divisé par la température, donne le coefficient linéaire, et, par suite, le coefficient cubique, qui est le triple du premier.

TABLE DE COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE DES SOLIDES ENTRE C° ET 100°.

Suivant Laplace et Lavoisier.

Flint-glass anglais. . . .	0,000008116
Verre de Saint-Gobain. . .	0,000008908
Acier non trempé.	0,000010788
Fer doux forgé.	0,000012204
Or au titre de Paris. . . .	0,000015156
Cuivre.	0,000017122
Laiton.	0,000018667
Argent au titre de Paris. .	0,000019086
Plomb.	0,000028485

Suivant Smeaton.

Verre blanc.	0,000008533
Fer.	0,000012585
Bismuth.	0,000013916
Étain fin.	0,000022853
Zinc.	0,000029416

SUIVANT LE MAJOR GÉNÉRAL ROY.

Fer fondu.	0,000011100
Acier.	0,000011445
Cuivre jaune de Hambourg.	0,000018555

SUIVANT TROUGHTON.

Cuivre.	0,000019188
Argent.	0,000020826

SUIVANT FROMENT.

Platine, un mètre type. . .	0,000007492

MM. Dulong et Petit ont déterminé le coefficient moyen entre 0° et 300° des corps suivants :

Platine.	0,000008842
Verre.	0,000010108
Fer.	0,000011831
Cuivre..	0,000017182

Application de la dilatation des solides. — *Pendule compensateur.* La formule $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, dans laquelle l est la longueur du pendule simple synchrone du pendule composé que l'on considère, montre que t augmente ou diminue avec l, c'est-à-dire avec la température, si le pendule est formé d'une tige unique. Le pendule compensateur a pour but de maintenir l constant.

Les lettres a, b, c, d, représentent des tiges de fer, les lettres b' et a', des tiges de laiton. Par leur dilatation, les tiges de fer tendent à abaisser la lentille du pendule, et les tiges de laiton à la remonter. Les deux effets se détruiront si les longueurs totales de fer et de laiton sont dans le rapport de leurs coefficiens de dilatation.

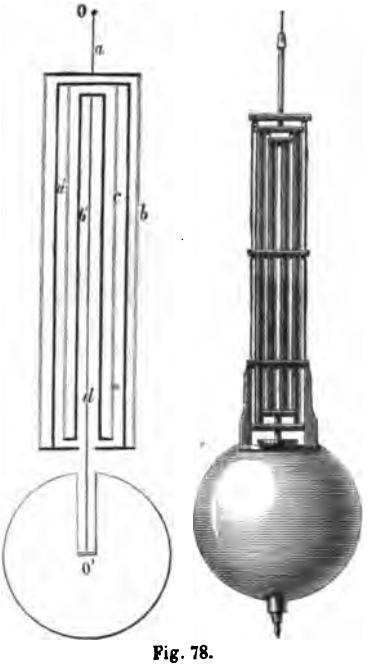


Fig. 78.

Dilatation des liquides. — Nous avons déjà montré la dilatation des liquides, mais nous avons vu en même temps que l'étude en était compliquée par la dilatation du vase qui renferme le liquide. On distingue pour un liquide : 1° la dilatation apparente, c'est-à-dire celle que paraît subir un liquide placé dans une enveloppe qui se dilate, mais dont on néglige le changement de capacité ; 2° la dilatation absolue du liquide. La dilatation apparente est l'excès de la dilatation absolue du liquide sur celle du vase qui le contient ; l'une pourrait donc se déduire de l'autre, si l'on connaissait bien la dilatation du vase.

Dilatation absolue du mercure. — C'est la plus importante à connaître, puisque le mercure se rencontre dans presque tous les appareils d'observation.

Méthode de Dulong et Petit. — Sur un bâtis en bois est placé un T en fer que l'on peut rendre horizontal par deux niveaux à bulle rectangulaires. Le T supporte un tube recourbé à deux branches verticales larges A et B, réunies par un tube horizontal presque capillaire, de sorte que les liquides de B et A ne peuvent se mélanger. On a d'abord rempli les tubes A et B jusqu'à la même hauteur, puis on maintient l'un à 0° dans le manchon M plein de glace, et on porte l'autre à des températures croissantes jusqu'à 300° et 350° au moyen d'un bain d'huile, dont deux thermomètres, l'un à l'air, l'autre à poids décrit plus loin,

donnent la température. Un repère fixe r est placé à une certaine hauteur au-dessus de l'axe du tube horizontal de communication, et c'est par rapport à ce repère que l'on prend au moyen d'un cathétomètre les niveaux du mercure en A et B.

En somme, on a à appliquer le théorème des vases communiquants, car les

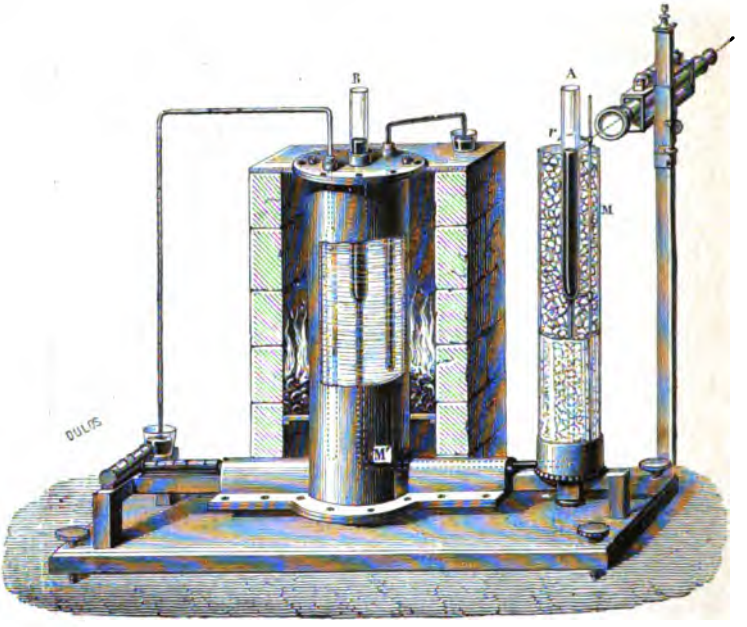


Fig. 79.

deux liquides dont les hauteurs sont h_t et h_o et les températures t et o^o, constituent des liquides différents, dont les densités sont d_t et d_o.

Fig. 80.

On a $\frac{h_t}{h_o} = \frac{d_o}{d_t}$, mais si Δ est le coefficient de dilatation absolue u mercure de o^o à t^o, on aura $d_o = d_t\,(1 + \Delta.t) = d_t.\frac{h_t}{h_o}$, donc $\Delta = \frac{h_t - h_o}{h_o t}$.

Les expérimentateurs trouvèrent que de 0° à 100°, $\Delta = \frac{1}{5550}$; puis le coefficient va sans cesse en augmentant; de 100° à 200°, la moyenne est $\frac{1}{5425}$, et de 200° à 300°, $\frac{1}{5300}$. A mesure qu'on approche de la vaporisation, la dilatation augmente.

Dilatation apparente du mercure dans le verre. — *Thermomètre à poids.* — Vase cylindrique en verre blanc avec tube capillaire recourbé; il est pesé avec soin, ainsi que la capsule qui reçoit le mercure. On remplit le vase de mercure à 0°, on le pèse, et soit P le poids du mercure introduit. On le porte à t^o, soit p le poids du mercure recueilli dans la capsule,

il reste $P - p$ de mercure, et si V et v représentent le volume des poids P et $P - p$ de mercure à 0°, on aura $\frac{V}{v} = \frac{P}{P - p}$; mais $V = v(1 + kt)$, puisque le volume v remplit le vase à $t°$; donc :

$$\frac{P}{P - p} = \frac{V}{v} = 1 + kt,$$

d'où :

$$k = \frac{p}{(P - p)t}.$$

On trouve de la sorte $k = \frac{1}{6480}$. Ayant une fois calculé k, on peut se servir de l'appareil comme thermomètre; en effet, connaissant p, on aura $t = \frac{p}{(P - p)k}$.

Le coefficient de dilatation absolue du verre est, d'après cela,

$$\Delta - k = \frac{1}{5550} - \frac{1}{6480} = \frac{1}{38700}.$$

La plupart des autres liquides se dilatent assez irrégulièrement, et nous n'ajouterons que quelques mots relativement à l'eau.

Dilatation de l'eau. — L'eau présente une curieuse anomalie. A partir de 0°, elle se contracte jusqu'aux environs de 4° (4°,1 suivant quelques auteurs). A partir de 4°, la dilatation commence, et à 8° le volume est à peu près le même qu'à 0°. La glace, étant plus légère que l'eau, flotte à la surface : au-dessous est de l'eau liquide, et au fond des fleuves est la couche de densité maxima correspondant au maximum de concentration, c'est-à-dire à 4°. Cette température relativement tempérée permet à la vie de ne pas s'éteindre sous des monceaux de glace.

Dilatation des gaz. — Gay-Lussac entreprit sur ce sujet important les pre-

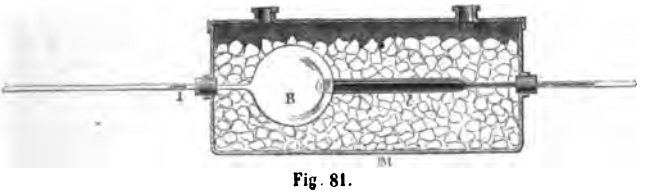


Fig. 81.

miers travaux avec l'appareil suivant : Un tube à réservoir R est plongé dans un récipient à 0°, puis dans une étuve à $t°$; le déplacement de l'index I indique les variations de volume de l'air sec suivant la température. Gay-Lussac donna les deux lois suivantes :

1° Tous les gaz ont même coefficient de dilatation que l'air; 2° ce coefficient ne change pas avec la pression. Ce coefficient α est égal à 0,00375, c'est-à-dire que de $t°$ à $(t + 1)°$ un volume d'air augmente de $\frac{375}{100,000}$. Budberg reprit ces expé-

riences, montra que la moindre quantité de vapeur d'eau augmentait beaucoup α, et donna pour ce nombre 0,00364. De plus, l'index de mercure, ne mouillant pas le tube, laisse passer une grande quantité d'air.

M. Regnault reprit les expériences avec un appareil perfectionné, et donna pour α la valeur $\frac{1}{273} = 0{,}003665$; il montra que les deux lois de Gay-Lussac, si simples et si séduisantes au premier abord, ne s'appliquaient pas, comme on peut le voir au tableau suivant. M. Regnault recourut à deux méthodes, il laissait la pression constante et constatait l'accroissement de volume, ou bien il conservait le volume constant et constatait l'accroissement de pression duquel il pouvait déduire l'accroissement de volume qui se serait produit.

TABLEAU DE LA DILATATION DES GAZ DE 0° A 100°

	Sous volume constant.	Sous pression constante.
Hydrogène	0,3667	0,3661
Air	0,3665	0,3670
Azote	0,3668	» »
Oxyde de carbone	0,3667	0,3669
Acide carbonique	0,3688	0.3710
Protoxyde d'azote	0,3676	0,3719
Acide sulfureux	0,3845	0,3003
Cyanogène	0.3829	0,3877

SOURCES DE CHALEUR

Insolation. — La principale souce de chaleur, celle qui entretient la vie de tout le règne végétal et animal, est la chaleur due aux rayons solaires.

Percussion. — La percussion produit de la chaleur, ce qui ne peut s'expliquer, pour les corps comme le plomb, dont la densité ne change pas par l'écrasement, que parce que la chaleur est une force vive communiquée aux molécules. (Voy. la théorie mécanique de la chaleur.)

Compression et dilatation des gaz. — On explique de la même manière les effets calorifiques qui apparaissent par ces actions mécaniques; la chaleur qui se produit lorsqu'on comprime un gaz, et l'abaissement de température que l'on observe lorsqu'on laisse croître son volume, sont deux effets du changement de travail mécanique en force vive moléculaire, et inversement. Une expérience de Joule démontre la correspondance des deux effets et est probante en faveur de la théorie mécanique de la chaleur.

Frottement. — Le frottement est aussi une cause de chaleur en faisant naître des mouvements vibratoires moléculaires.

Combustion. — Les combinaisons chimiques, et surtout la combustion des corps combustibles, principalement du charbon, dans l'oxygène de l'air, constituent la source de chaleur artificielle toujours employée dans l'industrie.

Pour mesurer les quantités de chaleur dégagées par une combinaison chimique, il suffit d'effectuer cette combinaison au milieu d'un calorimètre de masse assez considérable pour que la température finale ne diffère de la température initiale que d'un petit nombre de degrés. La quantité de chaleur recueillie par le calorimètre ou cédée par lui est très-voisine de la quantité de chaleur produite ou absorbée par la réaction.

C'est ainsi que MM. Favre et Silbermann sont arrivés à trouver les quantités de chaleur dégagées par la combustion de l'unité de poids de quelques corps simples :

Un kilogramme	d'hydrogène en brûlant dégage.	34,460	calories
—	de charbon de bois changé en acide carbonique.	8,080	—
—	de charbon de bois changé en oxyde de carbone.	2,473	—
—	de diamant.	7,770	—
—	de soufre octaédrique.	2,220	—
—	de soufre prismatique.	2,260	—

La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour changer de 1° la température de 1 kilogr. d'eau.

Il est facile d'appliquer les données précédentes au calcul de la température maxima qui peut être obtenue d'un combustible donné.

Chaleur animale. — Lavoisier lui attribua une origine chimique. Mais il est bien difficile, dans l'état actuel de la physiologie, de prouver que la quantité de chaleur produite est précisément égale à celle que demande la combustion du carbone et de l'hydrogène que l'animal absorbe sous tant de formes. On comprend bien que la question est fort complexe.

La végétation a pour but de fixer le carbone, c'est-à-dire de décomposer l'acide carbonique de l'air. Or la formation de l'acide carbonique dégage de la chaleur; sa destruction doit donc en absorber. Et en effet, on sait que la végétation a besoin de soleil pour se développer, et qu'elle est d'autant plus vigoureuse que le soleil est plus ardent.

Chaleur rayonnante. — Supposez au milieu d'une salle une masse de fer incandescente; elle échauffe tous les objets autour d'elle, et les effets calorifiques se transmettent à travers l'air et les corps interposés. C'est ainsi que le soleil échauffe la terre et les objets qui se trouvent à sa surface.

La chaleur rayonnante est celle que les corps se transmettent à distance ou à travers les milieux interposés. Elle entre en partie dans les corps pour les modifier; elle rebondit ou se réfléchit en partie à leur surface pour aller frapper un autre point.

Un corps, échauffé par d'autres, joue lui-même, par rapport à ces autres corps et par rapport aux corps voisins, le rôle d'un centre de chaleur; il en émet et en rayonne vers l'espace : de sorte qu'à une substance donnée correspondent trois pouvoirs différents :

1° Le pouvoir émissif ou rayonnant : il est mesuré par la plus ou moins grande quantité de chaleur qu'émettent les corps à une même température et sous la même surface;

2° Le pouvoir absorbant : il se mesure par la plus ou moins grande quantité de chaleur, émanée d'une autre source, que le corps peut absorber;

3° Le pouvoir réflecteur : il se mesure par la proportion de chaleur qui rebondit à la surface du corps sans y pénétrer.

Tout ce qui n'est pas absorbé dans un faisceau calorifique est réfléchi, donc les pouvoirs absorbant et réflecteur sont complémentaires.

Dans tous ces phénomènes, nous trouvons toujours le même caractère relatif que nous avons signalé en définissant la chaleur : ainsi un corps plus froid que tous ses voisins leur envoie cependant de la chaleur rayonnante, et tend à se

mettre en équilibre avec eux. Il faut bien se pénétrer que nous n'employons pas le terme chaleur dans le sens que le public y attache d'ordinaire.

Thermomètre différentiel de Nobili. — 1° *Pile thermo-électrique.* — Cet appareil se compose d'une série de barreaux d'antimoine A et de bismuth B soudés ensemble, et réunis en faisceaux dans une gaine de laiton. Ces barreaux

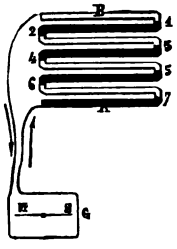


Fig. 82.

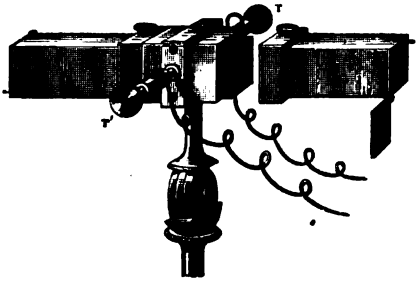


Fig. 83.

ne se touchent point. Lorsqu'il y a une différence de température entre la face des soudures impaires et la face des soudures paires, il se produit dans le circuit un courant électrique, qui se propage dans les fils de laiton attachés aux derniers éléments métalliques.

2° *Galvanomètre.* — Le galvanomètre se compose d'une aiguille aimantée environnée d'un fil métallique, où passe un courant électrique : la déviation de l'aiguille est proportionnelle à l'intensité du courant, et comme l'intensité du courant produit par la pile thermo-électrique est proportionnelle à la différence de température qui se produit entre les deux faces du faisceau, il est clair qu'on mesurera l'intensité de la chaleur reçue par la pile, en mesurant la déviation de l'aiguille du galvanomètre.

Cet ensemble constitue le thermomètre différentiel de Nobili.

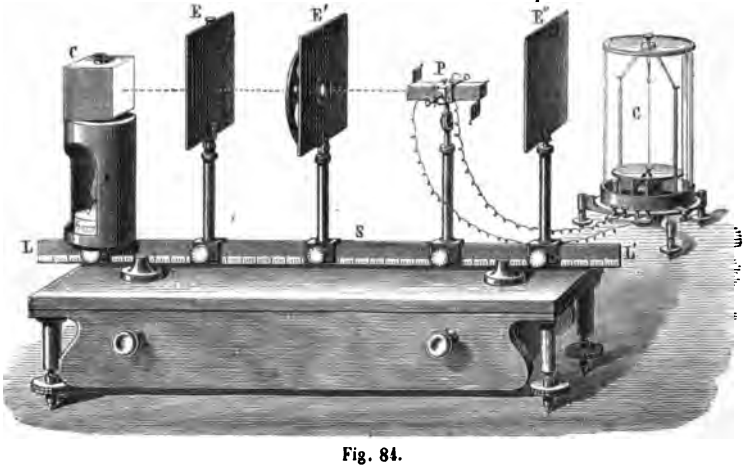


Fig. 84.

En réalité, la proportionnalité de la chaleur reçue à la déviation de l'aiguille

n'est pas très-exacte : cependant, il a été reconnu que, dans les limites des expériences, cette hypothèse s'éloignait peu de la vérité.

Appareil de Melloni. — La source de chaleur est en C et se compose soit d'un cube à parois mobiles, et rempli d'eau constamment bouillante, soit de la lampe de Locatelli à mèche prismatique, soit d'un fil de platine maintenu au rouge par les vapeurs qui se dégagent d'une lampe à alcool non allumée. E et E″ sont des écrans qui protégent la pile contre les rayonnements du dehors. E′ est un écran percé d'un trou rond, qui limite la section du faisceau de chaleur reçu par la pile. La règle LL′ est graduée, et la pile et les écrans sont mobiles le long de cette règle. G est le galvanomètre dont l'aiguille, par ses déviations, indique les températures (*fig.* 82).

Loi du rayonnement. — 1° La chaleur se transmet en ligne droite ; car placez un écran très-petit entre la source et le thermomètre, celui-ci revient à sa température initiale.

2° La chaleur se transmet dans le vide aussi bien que dans l'air : elle a la même intensité dans toutes les directions. Cela est facile à vérifier.

3° L'intensité de la chaleur rayonnante est proportionnelle à la température de la source, en raison inverse du carré des distances, et inversement proportionnelle au cosinus de l'angle que fait la normale à la source calorifique avec la droite qui joint la source au point échauffé. A l'inspection de l'appareil de Melloni, on comprend bien comment ces lois se vérifient : c'est en changeant la température de la source, ou la distance de la source C à la pile P, ou l'inclinaison de la face du cube C sur la ligne LL′.

Quand un corps se refroidit dans un espace vide, il perd sa chaleur par rayonnement. Lorsque plusieurs corps sont en présence, les uns chauds, les autres froids, ils tendent à se mettre en équilibre de température ; les uns envoient moins de chaleur qu'ils n'en reçoivent, les autres plus qu'ils n'en reçoivent.

Pouvoirs émissifs. — Melloni donnait au cube C, de température constante,

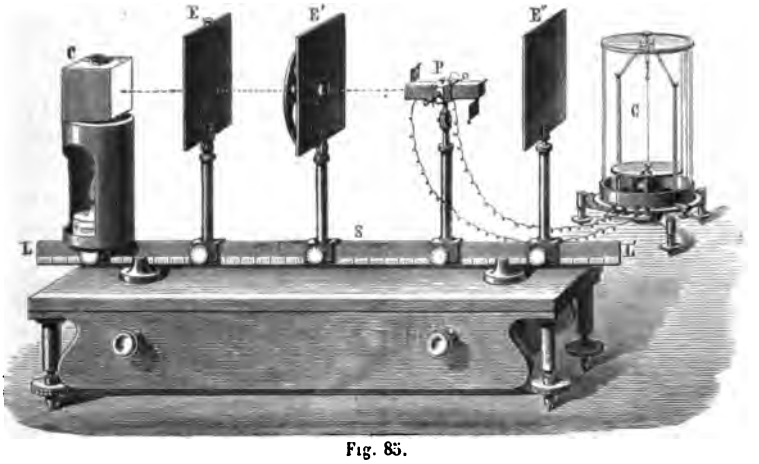


Fig. 85.

des faces mobiles, composées de substances différentes : il étudiait l'effet produit sur la pile et le galvanomètre par les diverses faces, et en déduisait les pouvoirs émissifs relatifs.

Des expériences récentes permettent de dresser le tableau suivant :

TABLEAU DES POUVOIRS ÉMISSIFS

Noir de fumée	1,00	Argent poli	0,02
Céruse	1,00	Argent mat	0,05
Colle de poisson	0,91	Or	0,04
Encre de chine	0,85	Laiton	0,05
Gomme laque	0.72	Platine bruni	0,10

Réflexion de la chaleur. — Quand un rayon de chaleur ou de lumière, dit rayon incident, tombe sur une surface réfléchissante en un point C, et s'y réfléchit, le rayon réfléchi RC fait avec la normale CN, un angle égal à celui du rayon incident avec la même normale.

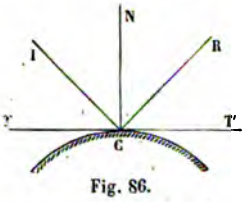


Fig. 86.

Vérifions cette loi pour la chaleur. — Soit deux miroirs paraboliques A et A′, argentés à l'intérieur ; au foyer de A est une source de chaleur, quelques charbons ardents. Les rayons réfléchis sont renvoyés parallèlement à l'axe, rencontrent le miroir A′ et viennent concourir au foyer F′. En effet, un morceau d'amadou placé en ce point s'y enflamme.

On peut encore vérifier la loi de l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion

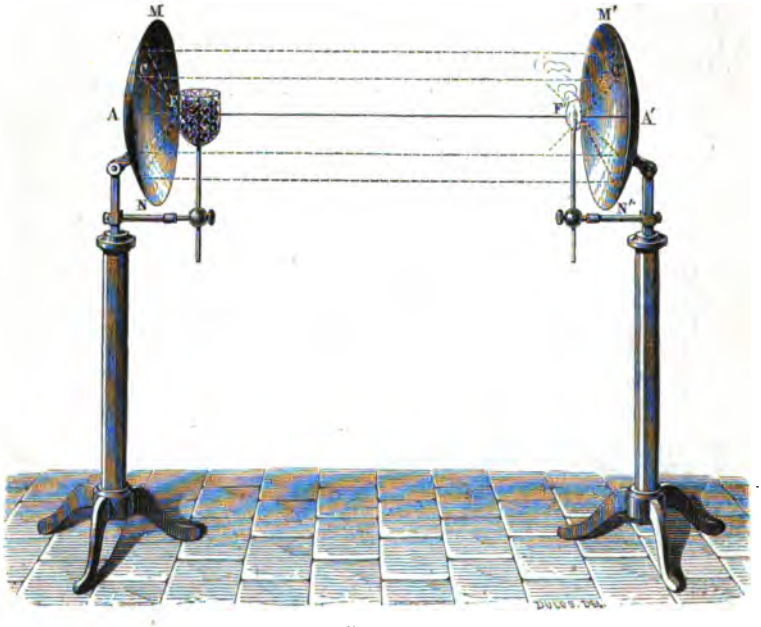


Fig. 87.

par l'appareil de Melloni modifié comme le montre la figure 88. La pile P n'est échauffée et l'aiguille du galvanomètre ne se meut qu'au moment où la ligne OP fait avec la plaque réfléchissante MM′ le même angle que le rayon incident fait avec cette plaque. Le cercle gradué C donne la mesure de ces angles.

Le même appareil permet de mesurer les pouvoirs réflecteurs, et l'on trouve que

L'argent réfléchit les	0,92	de la	chaleur solaire qui le frappe.
L'acier.	0,60	—	—
Platine poli. . . .	0,60	—	—
Or.	0,87	—	—

Loi de Newton sur l'échauffement et le refroidissement. — La vitesse d'échauffement ou de refroidissement, c'est-à-dire la quantité de chaleur perdue ou gagnée dans l'unité de temps, augmente avec la différence des températures

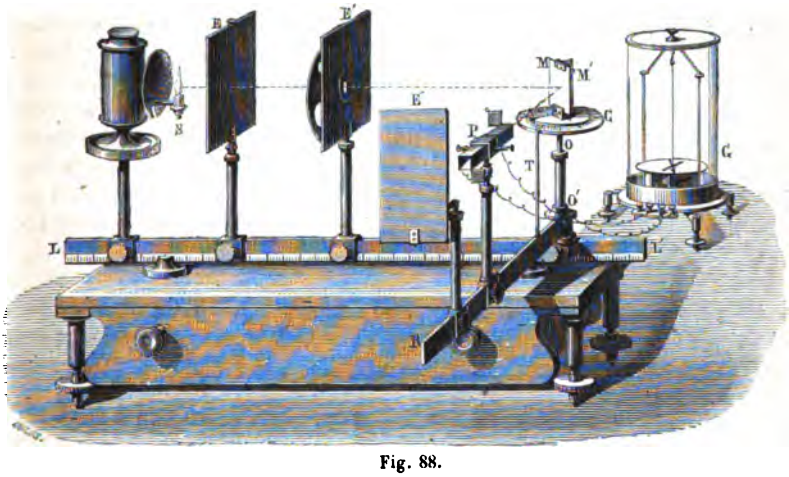


Fig. 88.

du corps et de l'enceinte. Newton avait ajouté que cette quantité était proportionnelle à la différence, Dulong et Petit ont montré que cela était inexact dès que la différence dépassait 15 ou 20° : la quantité de chaleur perdue ou gagnée est alors plus grande que ne le voudrait la loi.

Comme application pratique de la théorie des pouvoirs absorbants, nous dirons que l'emploi des vêtements blancs est parfaitement justifié dans les pays chauds par ce fait que le pouvoir absorbant du blanc est bien inférieur à celui du noir.

UNITÉ DE CHALEUR. — CHALEURS SPÉCIFIQUES

Unité de chaleur. — L'unité de chaleur adoptée par les physiciens est appelée calorie. La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° un kilogramme d'eau pure ; cette quantité est généralement constante.

Prenons un autre corps, un métal, le mercure, je suppose, et cherchons à élever sa température d'un degré, nous verrons qu'il faut 33 fois moins de chaleur que pour élever d'un degré la température d'un poids égal d'eau ; et les autres corps nous donneront des résultats analogues.

Chaleurs spécifiques. — D'après cela nous appellerons chaleur spécifique ou capacité calorifique d'un corps, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de 1 kilogramme de ce corps.

Détermination par la méthode du puits de glace. — Dans un bloc de glace,

on taille un trou et un couvercle ; on essuie bien l'intérieur avec un linge fin, puis on y place un corps solide porté à $t°$; il fait fondre une partie de la glace, et descend à 0° ; alors, on ouvre, et on recueille l'eau fondue que l'on pèse. Or, on sait que pour fondre, pour passer simplement de l'état de glace à 0° à l'état d'eau à 0°, l'eau absorbe 79,2 calories. On a donc la quantité de chaleur perdue par le corps : avec son poids et la température t, il est facile de calculer la chaleur spécifique.

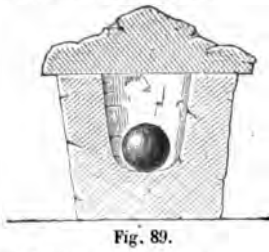


Fig. 89.

Méthode des mélanges. — A un poids connu d'eau à une certaine température, mêlez un poids également connu d'une autre substance à une température supérieure ; agitez le mélange et observez la température finale ; l'eau s'est réchauffée, le corps s'est refroidi, et la quantité de chaleur gagnée par l'eau est précisément celle que le corps a perdu. On sait donc quel changement de température une quantité déterminée de chaleur produit sur l'eau et sur le corps.

Sur un socle de bois et liége repose un vase de laiton rempli d'eau à $t°$, on y projette un corps solide contenu dans un petit panier de fil de laiton, le tout à T°, on agite, et on observe la température finale $\theta°$. Il y a lieu de tenir compte de la chaleur absorbée par le vase et le panier en laiton, et c'est le poids spécifique du laiton qu'il conviendra de chercher tout d'abord.

Si (m) est le poids de l'eau, (m') le poids du vase, m'' le poids du panier, et M le poids du laiton en expérience dans le panier ; appelons (c) la chaleur spécifique du laiton, celle de l'eau étant 1°.

La chaleur perdue est celle du corps M et du panier m'' ; elle est égale à

$$Mc(T-\theta)+m''c(T-\theta)=(M+m'')c(T-\theta).$$

La chaleur gagnée l'a été par l'eau m et le vase m', elle est égale à

$$m(\theta-t)+m'c(\theta-t)=(\theta-t)(m+m'c).$$

Égalant la chaleur perdue à la chaleur gagnée, on aura l'équation $(M+m'')c(T-\theta) = (\theta-t)(m+m'c)$, équation qui donnera c, chaleur spécifique du laiton.

Si maintenant, nous plaçons dans le panier un autre corps de poids M, et de chaleur spécifique C, la chaleur perdue par le corps M et le panier m'' sera $MC(T-\theta)+m''c(T-\theta)$, la chaleur gagnée par le vase m' et l'eau m sera $m(\theta-t)+m'c(\theta-t)$, et la chaleur spécifique cherchée sera donnée par l'équation.

$$(MC+m''c)(T-\theta)=(m+m'c)(\theta-t)$$

Appareil de M. Regnault. — Le corps réduit en poudre est dans le panier C' où plonge la boule du thermomètre T. Le panier est plongé dans l'étuve S', où le fourneau S envoie un courant de vapeur qui vient se condenser dans un serpentin. La température du corps est donc déterminée et bien connue.

Le vase N en laiton, protégé contre le rayonnement de l'étuve et du fourneau par l'écran E', est plein d'eau dont le thermomètre T' donne la température. Ce vase N glisse sur un rail en bois et on peut l'amener sous l'étuve ; on tire alors le tiroir K, on lâche le fil qui soutient le panier de laiton, et le corps tombe dans

l'eau. Le vase N est protégé contre le rayonnement du fourneau par un autre vase M de forme particulière, comme le montre la figure, et qui est rempli d'eau. Le

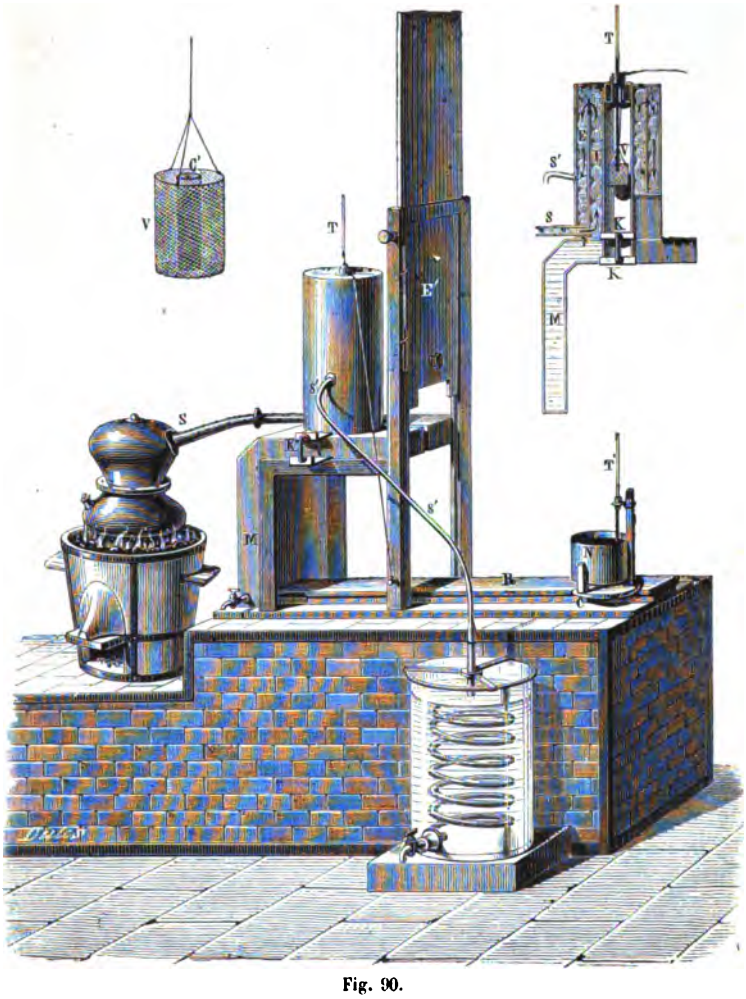


Fig. 90.

thermomètre T' monte, et on observe à distance avec un cathétomètre jusqu'à ce que le maximum de température soit atteint. On voit que toutes les précautions sont prises.

TABLEAU DES CHALEURS SPÉCIFIQUES ENTRE 0° ET 100°

Eau	1,00000	Cuivre	0,09515
Charbon de bois calciné	0,24111	Laiton	0,09391
Verre des thermomètres	0,19768	Argent	0,05701
Fonte blanche	0,12983	Mercure	0,03332
Fer	0,11379	Or	0,03244
Acier doux	0,11650	Platine	0,03243
Zinc	0,09555		

Remarque. — La chaleur spécifique est plus grande à l'état liquide qu'à l'état solide. Pour un même corps, elle croît avec la température.

Loi de Dulong et Petit. — Le produit de la chaleur spécifique d'un corps par son poids atomique est constant. (Voy. en chimie la définition du poids atomique.)

CONDUCTIBILITÉ

Conductibilité. — Lorsqu'on échauffe un corps en un point de sa masse, la chaleur se transmet plus ou moins vite aux points situés à une certaine distance de la source. Lorsque la transmission est rapide, les corps sont bons conducteurs, les métaux en général sont dans ce cas ; lorsque la transmission est très-lente, on dit que les corps sont mauvais conducteurs, c'est le cas du verre, des étoffes, du bois, du charbon.

Les gaz et les liquides sont mauvais conducteurs ; en effet, on peut avoir de l'eau dans un vase, élever la température des couches voisines de la surface jusqu'à 60° ou 70°, sans pour ainsi dire faire varier la température des couches du fond. On reconnaît cependant que la propagation se fait et que les températures varient en progression géométrique, quand les distances à la source varient en progression arithmétique (*fig.* 91).

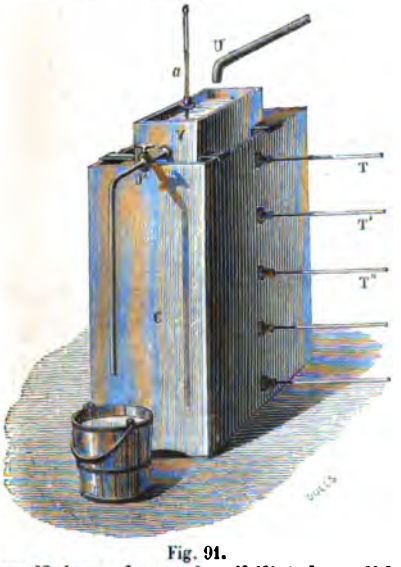


Fig. 91.

Le vase V est rempli d'eau chaude renouvelée à intervalles égaux par les tuyaux U et V' ; les thermomètres TT'T'' sont équidistants.

Quand un liquide est chauffé par le bas, il est impossible de constater sa conductibilité, car les couches du bas dilatées tendent à s'élever, le mélange se fait et une température uniforme s'établit.

Appareil d'Ingenhouz. — Un appareil inventé par Ingenhouz, sert à mesurer les coefficients de conductibilité des solides.

Sur la paroi d'une cuve pleine d'eau chaude on implante des tiges solides formées de diverses substances et recouvertes de cire. La cire fond sur des longueurs inégales que l'on prend pour mesure des conductibilités.

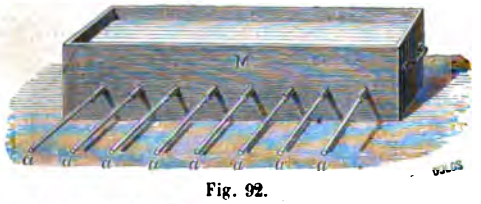


Fig. 92.

Les matières organiques sont mauvaises conductrices de la chaleur : les cristaux présentent des conductibilités différentes dans les diverses directions, de même qu'ils présentaient des dilatabilités différentes.

TABLEAU DE LA CONDUCTIBILITÉ DES SOLIDES

Or	1,000	Etain	303
Platine	981	Plomb	180
Argent	972	Marbre	24
Cuivre	898	Porcelaine	12
Fer	374	Terre de brique	11
Zinc	363		

Loi de la transmission. — Dans une barre solide, échauffée en B, on a ménagé de petites cavités pleines de mercure où l'on met des thermomètres équidistants.

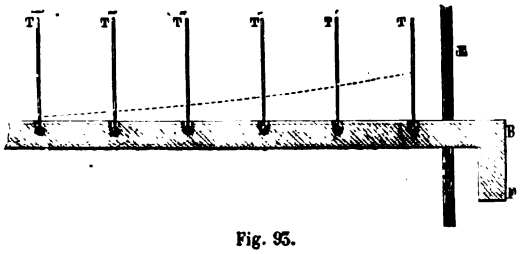


Fig. 95.

On reconnaît de la sorte que les températures varient en progression géométrique quand les longueurs varient en progression arithmétique.

CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS

Tout le monde sait qu'en chauffant un corps, on le fait passer de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état gazeux; l'effet inverse se produit par refroidissement.

Fusion et solidification. — *Fusion.* — La fusion a lieu soit par ramollissement successif (verre, cire, résine, corps gras), soit par liquéfaction brusque quand la température s'élève, et à une température qui reste constante pendant toute la durée du phénomène ; à chaque corps correspond un point de fusion : nous allons donner cette température de fusion pour quelques corps :

TEMPÉRATURE DE FUSION DE QUELQUES CORPS

L'acide sulfureux fond à	— 100°	L'acide stéarique fond à	70°
L'acide carbonique	— 78°	Le soufre	115°
Le mercure	— 40°	L'étain	228°
L'acide hypoazotique	— 9°	Le plomb	332°
L'eau	0°	L'antimoine	433°
Le chlorure de calcium hydraté à	29°	L'argent	1000°
Le phosphore	44° 2	L'or	1250°
La cire	64°	Le fer	1500°

Tous les corps sont fusibles, même le platine, même le charbon qu'on est arrivé à ramollir par la chaleur électrique. Les sources de chaleur assez intenses nous font seules défaut.

La solidification a lieu à une température constante qui est celle de la fusion.

Il y a pourtant des exceptions : l'état solide est un état absolument stable que le corps conserve après l'avoir pris, l'état liquide n'a qu'une stabilité imparfaite, et il suffit d'un petit dérangement moléculaire pour amener une solidification instantanée. Ainsi, dans un calme absolu, l'eau peut descendre à — 12° sans se congeler : mais au moindre choc elle se prend en masse et la température remonte brusquement à 0°.

Un tube est rempli à chaud d'une solution concentrée de sulfate de soude, puis il est fermé à la lampe d'émailleur : si on revient à la température ordinaire, le sulfate reste en dissolution, mais, si l'on casse brusquement la pointe du tube, aussitôt le choc de l'air fait prendre la solution en masse solide.

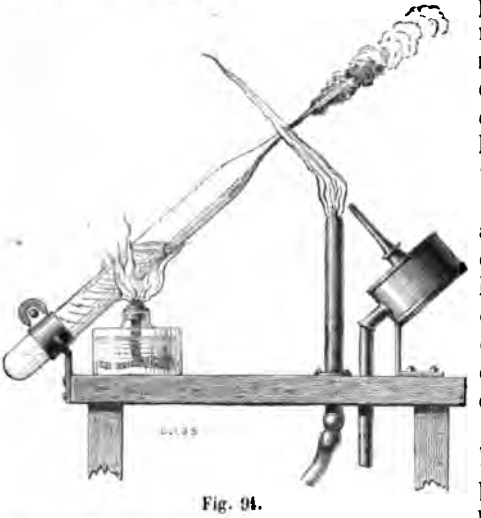


Fig. 94.

Dans la fusion, il y a généralement augmentation de volume ; cependant la glace fait exception, et aussi le bismuth qui, coulé dans des tubes de verre, le fait éclater en se solidifiant ; l'eau, en se congelant, fait de même éclater une bombe creuse ou un canon de fusil.

La pression qui tend à rapprocher les molécules, fait monter la température de fusion. Exemple : La paraffine fond à 46°,3 sous une pression de 1 atmosphère et à 49°,9 sous une pression de 100 atmosphères ; le blanc de baleine fond à 47°,7 à 1 atmosphère, et à 50°,9 à 156 atmosphères.

Deux fragments de glaces étant pressés l'un contre l'autre par une force, si petite qu'elle soit, il doit y avoir fusion au point de contact, puisque la densité tend à augmenter ; mais l'eau ainsi formée, se trouvant soustraite à la pression dès qu'elle s'écarte du point de contact des deux morceaux de glace, se congèle de nouveau, et les fragments de glace deviennent adhérents entre eux. Expérience du professeur Tyndall : la glace comprimée entre deux moules en buis, se brise d'abord en fragments, puis les fragments se soudent par la pression et on peut ainsi fabriquer avec la glace tel vase que l'on veut, par exemple une coupe à boire, une bouteille de glace.

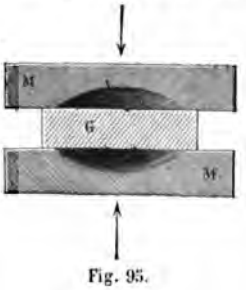


Fig. 95.

Vaporisation. — Le passage de l'état liquide à l'état gazeux, et le passage inverse présentent des caractères très-différents de ceux des changements d'état qu'on vient d'étudier. L'existence simultanée d'un même corps à l'état gazeux et à l'état liquide ou même solide s'observe avec la plus grande facilité et dans une étendue de température très-considérable.

Formation des vapeurs dans le vide. — L'atmosphère par sa pression empêche une vaporisation abondante des liquides. Mais dans le vide, les vapeurs se dégagent instantanément et remplissent l'espace. Si l'on fait passer avec une pipette courbe un peu de liquide dans la chambre barométrique, le liquide se résout en vapeur, et la pression de celle-ci fait baisser la colonne mercurielle. La diffé-

rence de la colonne restante avec la hauteur barométrique donne la pression ou tension de la vapeur. Cette tension s'appelle force élastique de la vapeur à la température de l'enceinte: on reconnaît ainsi que : 1° Dans le vide, tous les liquides passent instantanément à l'état de vapeur, 2° à la même température, les vapeurs de différents liquides ont des forces élastiques différentes.

Si, au lieu d'introduire, comme nous venons de le faire, une faible quantité de liquide dans la chambre barométrique, nous en avions introduit un excès, tout le liquide ne se volatiliserait pas ; il en resterait une partie, et l'on dit alors très-

Fig. 96.

Fig. 97.

justement que l'espace est saturé de vapeur. La quantité de vapeur nécessaire à saturer un espace augmente ou diminue avec la température : mais, à une même température, la pression reste constante, quel que soit le volume de l'espace saturé. Si l'on a, dans la cuve profonde qui nous a servi pour la loi de Mariotte, si l'on a, dis-je, un tube barométrique, qu'on y fasse passer de l'éther de manière à saturer l'espace, on pourra élever ou abaisser ce tube, faire passer une partie du liquide à l'état gazeux ou inversement, mais la pression restera la même. A

moins que le volume augmente tellement, que tout le liquide disparaisse ; alors nous avons affaire à un gaz, et les pressions obéiront à la loi de Mariotte, tant qu'on continuera à élever le tube, et tant qu'on le rabaissera ensuite jusqu'au moment où la saturation se produira de nouveau et où un peu de gaz redeviendra goutte liquide.

Maximum de force élastique. — Le maximum de tension ou de force élastique, à une température donnée, est la tension constante qu'affecte la vapeur lorsque l'espace qui la contient en est saturé. Nous venons de voir, que, dans les

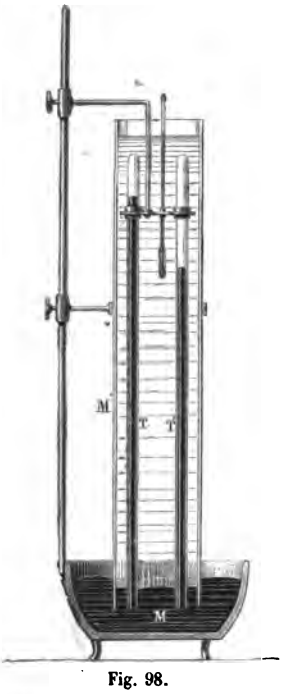


Fig. 98.

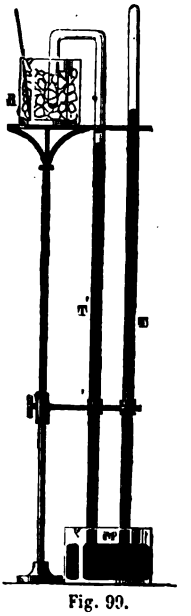


Fig. 99.

espaces saturés par une vapeur, si la pression augmente, une partie de la vapeur se condense et s'ajoute au liquide ; si la pression diminue, le liquide émet de nouvelles quantités de vapeur et la force élastique reste invariable.

Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau à diverses températures. — 1° *Méthode de Dalton.* — Dans une cuve M est de l'eau, qui repose sur une cuve de mercure chauffé par un fourneau ; T est un baromètre ; T′ en est un autre pour lequel il y a une petite colonne d'eau au-dessus du mercure. La dénivellation donne la force élastique, à la température indiquée par le thermomètre qui plonge dans l'eau. On a ainsi les tensions jusqu'à + 50° (*fig.* 98).

2° *Méthode de Gay-Lussac.* — Principe du condenseur de Watt : lorsque plusieurs points de l'espace qui contient la vapeur sont à des températures différentes, la tension maxima est celle qui correspond à la plus petite des températures. Ce principe, si utile dans le condenseur des machines à vapeur, a été utilisé par Gay-Lussac pour déterminer les tensions de la vapeur au-dessous de 0° : Il plongeait la branche recourbée du tube barométrique dans un mélange réfrigérant de température connue (*fig.* 99).

Ces appareils sont nécessairement imparfaits : M. Regnault les a perfectionnés, et nous pouvons donner aujourd'hui le tableau suivant très-exact :

TABLEAU DES TENSIONS DE LA VAPEUR D'EAU A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES

Température.	Tensions.	Température.	Tensions.	Température.	Tensions.
— 32°.	0mm 32	30°.	31mm 55	134°.	3atm 008
— 20°.	0 93	40°.	54 91	144°.	4 000
— 10°.	2 09	50°.	91 98	152°.	4 971
— 5°.	3 11	60°.	148 79	159°.	5 966
0°.	4 60	70°.	233 09	171°.	8 036
+ 5°.	6 53	80°.	354 64	180°.	9 929
10°.	9 16	90°.	525 45	189°.	12 155
15°.	12 70	100°.	760 00	199°.	15 062
20°.	17 39	100°.	1atm 000	213°.	19 997
25°.	23 55	121°.	2 025	225°.	25 127
				230°.	27 534

TABLEAU DES TENSIONS A DIVERSES TEMPÉRATURES.

DE LA VAPEUR D'ALCOOL.		DE LA VAPEUR DE MERCURE.		DE LA VAPEUR DE SOUFRE.	
Températures.	Tensions.	Températures.	Tensions.	Températures.	Tensions.
— 20°.	3mm 34	100°.	0mm 746	390°.	272mm 31
0°.	12 70	150°.	4 266	400°.	328 98
+ 10°.	24 23	200°.	19 90	440°.	663 11
20°.	44 46	250°.	75 75	450°.	779 89
30°.	78 52	300°.	242 15	500°.	1635 32
50°.	219 90	350°.	663 18	550°.	3086 51
75°.	665 54	360°.	787 74	570°.	3877 08
80°.	812 91	400°.	1587 96		
100°.	1697 55	450°.	3384 35		
129°.	3746 88	500°.	6520 25		
155°.	8259 19	520°.	8264 96		

Remarque. — 1° Les machines à vapeur à haute pression sont beaucoup plus dangereuses que les machines à basse pression, parce que pour arriver à la tension d'essai, il faut, dans les dernières, une plus grande élévation de température que dans les premières. 2° Le mercure est un excellent liquide pour les manomètres, parce que entre 100° et 200°, la tension des vapeurs mercurielles est très-faible.

Mélange des gaz et des vapeurs. — La pression d'un gaz placé sur un liquide l'empêche de se volatiliser, mais la tension maxima de la vapeur n'en est pas moins celle qui convient à la température de l'espace. Ainsi, la pression de la vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère, peut s'obtenir immédiatement, si l'air est saturé, à l'inspection de la table des tensions que nous avons donnée plus haut.

Le tube A étant plein de mercure, on visse dessus le ballon B plein de gaz et on ouvre les robinets RR'R", le mercure s'écoule et aspire le gaz. Quand il y en a assez on ferme R" et R', et l'on verse un peu de liquide dans un creux que présente R, puis on ouvre R' et on tourne R ; le liquide tombe dans le gaz et donne de la vapeur dont la tension refoule le mercure pour le soulever dans la petite branche. On a donc la tension de la vapeur, et on voit qu'elle est la même que si e gaz n'était pas là (*fig.* 100).

Densité d'une vapeur. — C'est le rapport du poids d'un volume donné de ette vapeur au poids d'un égal volume d'air pris dans les mêmes circonstances

de température et de pression. Les procédés sont analogues à ceux que nous avons signalés pour la densité des gaz.

Fig. 100.

La densité n'est pas constante et varie beaucoup avec la température et la pression. En effet, les vapeurs n'obéissent ni aux lois de la dilatation ni à la loi de Mariotte que suivent les gaz, à moins que l'on ne considère les vapeurs à une distance très-éloignée du point d'ébullition de leur liquide. Alors, elles arrivent à prendre une densité constante, ce que l'on constate par exemple pour la vapeur de soufre. En effet, à ce moment, les vapeurs sont devenues de véritables gaz, et elles en ont toutes les propriétés.

Ébullition. — Lorsqu'on élève graduellement la température d'un liquide, il arrive le plus souvent que, lorsqu'une certaine température est atteinte, à l'évaporation superficielle s'ajoute une formation intérieure de bulles de vapeur, qui partent des parois chauffées, traversent le liquide, et viennent crever à sa surface. A partir de ce moment, la température du liquide demeure invariable et ne diffère pas sensiblement de la température où la tension maxima de la vapeur est égale à la pression de l'atmosphère. Il en est du moins ainsi lorsque l'ébullition se fait par bulles petites et nombreuses; si les bulles de vapeur sont volumineuses et rares, la formation de chaque bulle est accompagnée d'une sorte de soubresaut, et la température oscille entre des limites plus ou moins approchées, suivant la nature du liquide, mais toujours supérieures à la température normale d'ébullition qu'on vient de définir.

La pression influe beaucoup sur l'ébullition. — Un liquide commence à bouillir lorsque la tension de la vapeur qu'il dégage dépasse un peu la tension de l'atmosphère qui surmonte le liquide; c'est ainsi que l'eau peut bouillir dans le récipient de la machine pneumatique, et le point d'ébullition s'abaisse d'autant plus que la raréfaction est plus grande. On constate de même que, sur les montagnes, l'eau bout au-dessous de 100°, et cette remarque peut servir à mesurer approximativement les hauteurs.

Sur un matras M, renversé et rempli d'eau chaude non bouillante, on place un linge mouillé A, la tension de la vapeur d'eau qui forme l'atmosphère intérieure du ballon diminue et le liquide se remet à bouillir (*fig.* 101).

La nature du vase influe sur la température d'ébullition. — L'eau bout à une température plus élevée dans le verre que dans un métal; si dans un vase contenant de l'eau dont l'ébullition vient de cesser, on projette de la limaille de fer, l'ébullition recommence aussitôt.

De l'eau purgée d'air par une ébullition prolongée peut, lorsqu'elle est contenue dans un tube à l'abri de l'air, s'échauffer bien au delà de 100°, jusqu'à 135° par exemple, sans entrer en ébullition; mais aussitôt que l'ébullition commence, il y a projection brusque et formation d'une énorme quantité de vapeur.

Lorsqu'on chauffe un liquide dans un vase clos où l'on a laissé un espace vide ou plein d'air, l'accroissement continuel de la force élastique empêche l'ébullition de se produire, et la température de la vapeur peut s'élever bien au delà de 100°,

comme dans les chaudières des machines à vapeur, ou dans la marmite de Papin, dont le couvercle est appuyé par un contre-poids (*fig.* 102).

Si l'on projette de l'eau sur une surface incandescente, il se forme des globules mobiles qui ne s'évaporent que très-lentement ; quand la plaque se refroidit, il arrive un moment où les globules détonent et se résolvent en vapeur. Il faut, pour

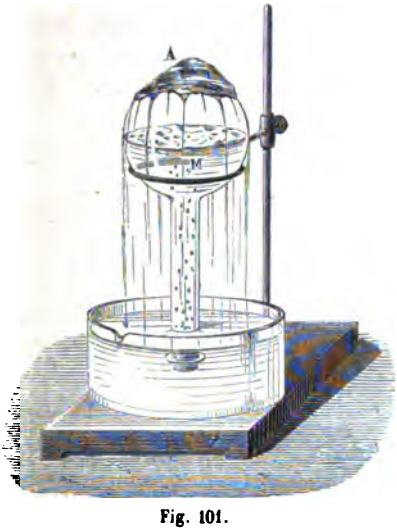


Fig. 101.

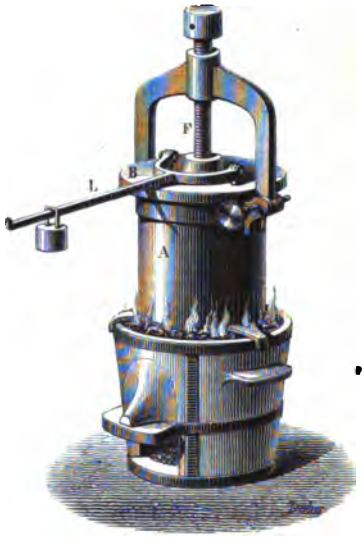


Fig. 102.

que l'expérience réussisse, que la température de la plaque soit très-élevée. En regardant ces globules, on voit qu'il n'y a pas contact entre eux et la plaque ; l'intervalle est rempli de vapeur qui empêche la transmission de la chaleur. La température du globule est toujours un peu inférieure à sa température d'ébullition.

Chaleur latente. — Nous avons vu que pendant la fusion ou la solidification d'un corps, la température ne change pas, et cependant le foyer ne cesse point de fournir de la chaleur. Cette chaleur est employée à produire la fusion elle-même ; elle est comme absorbée par les molécules qui se liquéfient, elle est nécessaire à leur écartement ; à dire vrai, elle s'est transformée en travail, elle a produit le travail nécessaire à la disjonction des molécules. Elle n'est point perdue pour cela, et quand le corps effectuera son retour à l'état solide, il dégagera une quantité de chaleur égale à celle qu'il avait absorbée. On appelle cette chaleur chaleur latente, et le nombre qui l'exprime est la quantité de calories nécessaire à un corps pour passer de l'état solide à l'état liquide, et inversement.

Un kilogramme d'eau à 0° et un kilogramme d'eau à 79°, donne deux kilogrammes d'eau à 39°,5, mais un kilogramme de glace à 0° et un kilogramme d'eau à 79° donne deux kilogrammes d'eau à 0°. Ainsi, pour passer de l'état de glace à 0° à l'état de liquide à 0°, l'eau absorbe 79 calories.

Mélanges réfrigérants. — La fusion des corps absorbe donc une grande masse de chaleur; on en a profité pour former des mélanges réfrigérants en mettant en présence des corps dont l'un excite la fusion de l'autre.

Exemples :

Proportion des mélanges.	Froid produit.
1. Neige ou glace pilée.	— 17°
1. Sel marin (chlorure de sodium).	
5. Acide chlorhydrique.	— 17°
8. Sulfate de soude.	
12. Neige ou glace pilée.	— 30°
5. Sel marin.	
3. Neige ou glace pilée.	— 28°
4. Chlorure de calcium cristallisé.	
8. Neige ou glace pilée.	— 68°
10. Acide sulfurique étendu. . .	

La formation des vapeurs exige toujours l'absorption d'une certaine quantité de chaleur latente, et il se passe là quelque chose d'analogue à ce que nous venons d'expliquer pour la fusion : les vapeurs revenant à l'état liquide exhalent ce même calorique qu'elles ont absorbé. L'évaporation ou l'ébullition refroidissent toujours ; les vases appelés alcarazas ne doivent leur fraîcheur qu'à la vaporisation de l'eau qui suinte à travers leurs parois.

La chaleur latente de fusion de l'eau est de 79°,25.

La chaleur latente de volatilisation, calculée si exactement par M. Regnault, est à 100° de 536,67 calories. A mesure que la pression augmente dans la chaudière, le point d'ébullition de l'eau s'élève et aussi sa chaleur latente, et si l'on ajoute à la chaleur latente le nombre T de calories qu'il faut donner à l'eau pour la porter de 0° à T°, on verra que pour porter de l'eau prise à 0° à l'état de vapeur se formant à T°, il faudra une quantité de calories.

$$\lambda = 606{,}5 + 0{,}305\,T.$$

Cette formule est utile dans la théorie des machines à vapeur.

Évaporation. — L'évaporation superficielle d'un liquide a lieu à toutes les températures où ce liquide a une tension de vapeur sensible, et ne s'arrête que lorsque l'espace ambiant est saturé de vapeur. Elle est donc évidemment favorisée par toutes les causes qui tendent à augmenter la tension des vapeurs émises par le liquide, ou qui s'opposent à la saturation de l'espace ambiant, c'est-à-dire :

1° Par l'élévation de température du liquide ou de l'atmosphère ambiante ;

2° Par le renouvellement plus ou moins rapide de cette atmosphère ;

3° Par l'absence complète de vapeur préexistante dans cette atmosphère ;

L'influence de l'étendue de la surface libre est trop évidente pour avoir besoin d'être expliquée.

Si l'atmosphère n'est ni entièrement privée ni entièrement saturée de la vapeur du liquide qui s'évapore, et si le liquide a même température que l'atmosphère, on admet, d'après Dalton, que la quantité de liquide évaporée en un temps donné est proportionnelle à l'excès de la tension maxima correspondant à la température actuelle sur la tension de la vapeur préexistante dans l'atmosphère. Dans le cas de l'eau au moins, cette proportionnalité a le caractère d'une loi empirique assez approchée. (On la vérifie en déterminant, dans des conditions atmosphériques diverses, le poids de l'eau qui s'évapore en un temps donné par une surface donnée.)

Hygrométrie. — Puisqu'un liquide émet toujours des vapeurs, même en présence d'un gaz, l'atmosphère est un mélange d'air et de vapeur d'eau en quantité variable. L'air n'est presque jamais saturé, et, à une température donnée, la force élastique de la vapeur est inférieure à la tension maxima correspondante, excepté dans les pays chauds et marécageux, où la vapeur se forme

sans cesse. Si l'on appelle f la force élastique de la vapeur contenue dans l'air, et F la tension maxima de cette vapeur à la température t du lieu, on appelle état hygrométrique du lieu la fraction $\frac{f}{F}$, et l'on voit que l'air du lieu s'approche d'autant plus de la saturation que la fraction s'approche de l'unité. Les hygromètres sont des appareils destinés à mesurer f; F est connu par les tables que nous avons données plus haut, puisque l'on connaît la température.

On distingue, avant les hygromètres, les instruments appelés hygroscopes, qui font voir, mais qui ne mesurent que grossièrement l'état hygrométrique.

Beaucoup de matières organiques, parmi lesquelles nous citerons les cheveux, les plumes, les boyaux de chat, présentent la propriété de s'allonger ou de se raccourcir, suivant que l'air ambiant est humide ou sec.

Rappelons ici le capucin qui se couvre ou se découvre par l'action d'un boyau de chat agissant sur un levier, et passons tout de suite à l'*hygromètre de Saussure*. Un cheveu A, arrêté en haut par la pince P, vient s'enrouler sur une poulie P′, et porte à son extrémité un petit poids B, destiné à le tendre. A l'axe de la poulie est une aiguille qui se meut sur un cadran dans un sens ou dans l'autre, suivant que le fil s'allonge ou se raccourcit. Sur le cadran sont marqués des degrés de 0° à 100° : 100° signifie humidité extrême, et s'obtient en laissant l'hygromètre longtemps stationnaire sous une cloche, dont les parois sont humectées d'eau, et qui repose sur un bassin plein d'eau; le 0 est la sécheresse extrême, et s'obtient par un séjour prolongé sous une cloche remplie d'air sec, et garnie de morceaux de chaux vive destinée à absorber toute humidité.

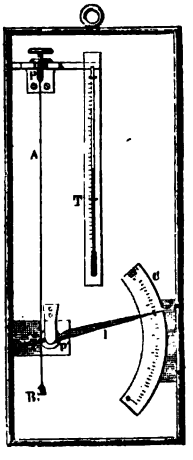


Fig. 103.

L'expérience apprend que les allongements du cheveu ne sont pas proportionnels aux fractions de saturation : l'hygromètre à cheveu n'est qu'un instrument empirique, pour lequel Gay-Lussac a dû construire des tables, dont voici un extrait :

ÉTATS HYGROMÉTRIQUES CORRESPONDANTS AUX INDICATIONS DE L'HYGROMÈTRE A CHEVEU, A LA TEMPÉRATURE DE +10°.

Degrés de l'hygromètre.	États hygrométriques.	Degrés de l'hygromètre.	États hygrométriques.
0	0,000	70	0,472
10	0,022	72	0,500
20	0,094	75	0,538
25	0,120	80	0,612
30	0,148	85	0,696
40	0,208	90	0,791
50	0,278	95	0,891
60	0,363	100	1,000
65	0,414		

Construction : Débarrasser le cheveu de toute la matière grasse qu'il renferme par une ébullition avec le carbonate de soude, ou par immersion dans l'éther ordinaire.

Calcul de la quantité de vapeur existant dans l'air, lorsqu'on connaît l'état hygrométrique.

L'état hygrométrique $E = \frac{f}{F}$, donne $f = E \times F$.

1 litre d'air à 0° pèse $1^{gr},3$, et à $t°$ $\frac{1^{gr},3}{1+\alpha t}$, et sous la pression f il pèsera $\frac{1^{gr},3}{1+\alpha t} \cdot \frac{f}{0,76}$. La densité de la vapeur d'eau est 0,622 par rapport à l'air, donc le poids de vapeur contenu dans 1 litre d'air à la température t pour l'état hygrométrique E sera $p = 0,622 \cdot \frac{1^{gr},3}{1+\alpha t} \cdot \frac{f}{0,76}$.

Hygromètre de condensation. — Hygromètre de Daniell. — La boule B en cuivre doré renferme de l'éther et est prolongée par un tube deux fois recourbé, se terminant par une boule B′ recouverte de gaze; avant de fermer l'appareil à la lampe d'émailleur, on a fait bouillir l'éther, dont les vapeurs ont chassé l'air, de sorte qu'il existe à l'intérieur du tube un vide relatif. Si, maintenant, nous versons quelques gouttes d'éther sur B′, il y a refroidissement, condensation de vapeur, diminution de tension, et évaporation de l'éther contenu en B; d'où un refroidissement de cette boule et de l'air qui l'environne; à un moment donné, la boule se ternit et se couvre d'une pellicule d'eau condensée, c'est qu'alors l'air ambiant se trouve sursaturé, et la tension de la vapeur qu'il renferme est F′; elle est donnée par les tables, en regardant la température que marque le thermomètre t plongé dans la boule B. On a donc F′, qui est précisément égal à f. D'autre part, le thermomètre, accolé au montant de l'appareil, donne la température t de l'air, et la table donne la valeur F correspondante; il est facile alors de calculer $E = \frac{f}{F}$. La difficulté est de bien observer le point de rosée sur la boule B : on peut dire de plus que le thermomètre t est plus refroidi que l'air extérieur entourant la boule B; les vapeurs de l'éther versées en B′ altèrent l'état hygrométrique, et la présence de l'opérateur agit dans le même sens. M. Regnault a perfectionné cet appareil, et fait disparaître toute cause d'erreur.

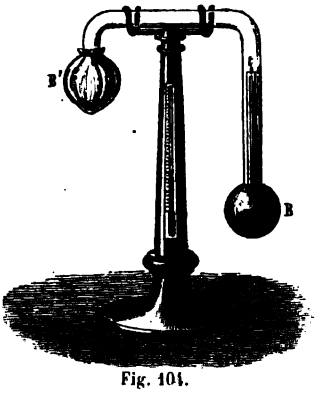


Fig. 104.

Vents. — Vous n'ignorez pas que la terre tourne autour du soleil en l'espace d'une année, et que le rayon vecteur ST décrit un plan appelé écliptique. D'autre part, la terre, sphéroïde renflé à l'équateur, tourne autour d'un axe, qui passe par ses pôles : cet axe n'est point perpendiculaire au plan de l'écliptique, et fait avec la normale à ce plan un angle de 23° environ. L'équateur terrestre fait donc le même angle avec le plan de l'écliptique.

Voyons maintenant l'action de la chaleur solaire sur l'atmosphère terrestre, et supposons pour un moment la coïncidence de l'équateur et de l'écliptique : les régions équatoriales reçoivent la chaleur normalement, et les régions polaires très-obliquement : l'air des premières s'échauffe donc beaucoup plus et tend à monter, et il se fait par en bas un appel des couches plus froides, appel qui

donne naissance à un grand courant gazeux rasant le sol, et dirigé du pôle à l'équateur.

Vents alizés. — La terre tourne de l'est à l'ouest, et entraîne dans son mouvement l'atmosphère : au pôle, cette vitesse est nulle, puis elle va croissant jusqu'à l'équateur, puisque la distance à l'axe de rotation croît aussi. Le grand courant gazeux qui du pôle se rend à l'équateur, va se trouver contrarié dans sa

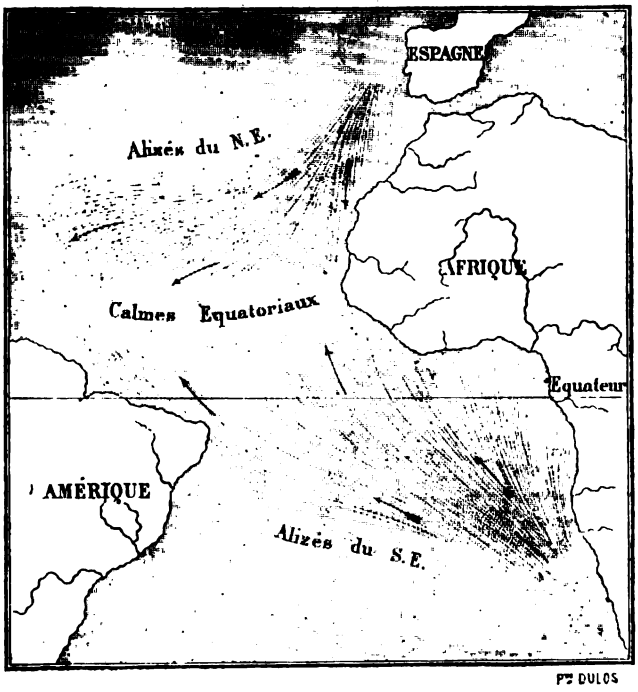


Fig. 105.

marche par la vitesse de l'atmosphère qui est normale à la sienne : les deux vitesses se composent, et donnent un courant d'air régulier; ce courant forme les vents alizés. Dans l'hémisphère boréal (le nôtre), ils soufflent du nord-est; dans l'hémisphère austral (sud), ils soufflent du sud-est. Les régions équatoriales jouissent d'un calme très-grand, puisque les mouvements de l'air s'y font verticalement.

Moussons. — Nous avons supposé que l'écliptique et l'équateur se confondaient, il n'en est rien, et certains points de la mer des Indes, par exemple, passent tantôt d'un côté de l'écliptique, tantôt de l'autre côté : ce phénomène a lieu deux fois par an, et donne lieu à des vents périodiques, appelés moussons, qui soufflent pendant six mois dans une direction, et pendant les six mois suivants dans une direction contraire.

Grands courants marins. — Il existe dans la mer de grands fleuves d'eau chaude, animés souvent d'une grande vitesse, et dont la connaissance est précieuse aux navigateurs. Ils sont indiqués sur la carte ci-jointe. On comprend bien qu'ils donnent naissance dans certaines régions à des vents réguliers, puis-

qu'ils échauffent la couche d'air à leur contact. Le principal est le Gulf-Stream, route ordinaire de France en Amérique, qui longe les côtes de l'Espagne et de

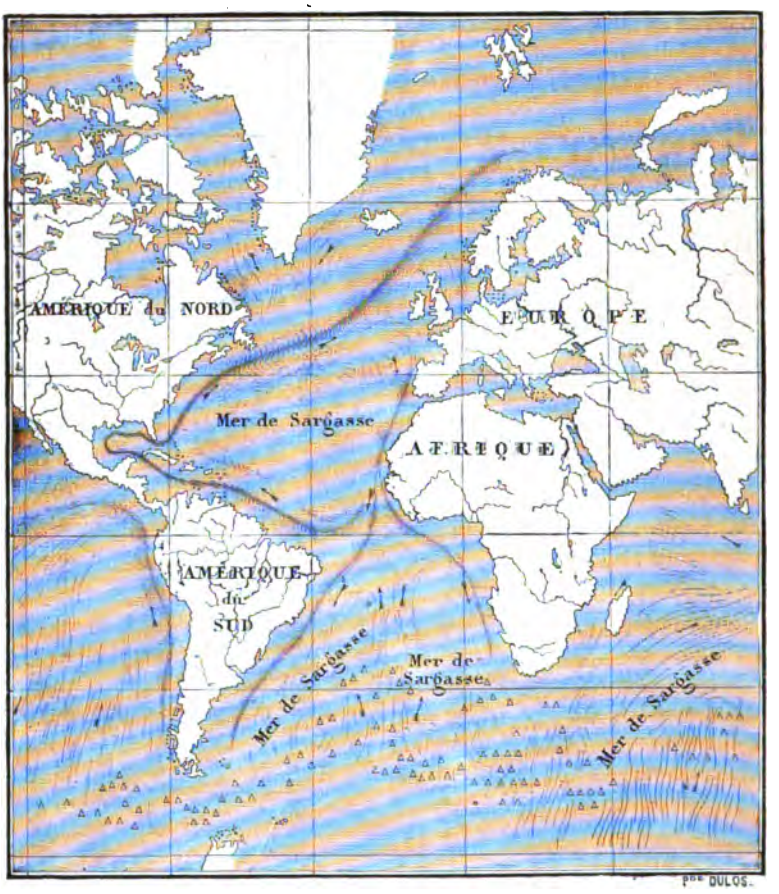


Fig. 106.

l'Afrique occidentale pour rebrousser vers les Antilles, le Mexique, les États-Unis, et aller mourir au nord de la Norwége. C'est à ce courant que l'Islande doit un climat supportable à l'homme.

Ouragans. — Lorsque deux courants gazeux se rencontrent, ils se composent et prennent un mouvement de rotation autour d'un axe variable dans l'espace, et plus ou moins incliné sur la verticale. Ils constituent un cyclone, et la pression est minima au centre, et maxima à une certaine distance. Lorsque l'axe s'appuie sur la mer et y est incliné, il la soulève et produit d'épouvantables ouragans, où périssent les navires les plus solides.

De la comparaison des pressions barométriques en divers points du globe, on peut prévoir, par comparaison, la marche du cyclone, qui s'avance avec une vitesse de chemin de fer, et cette science nouvelle de la prévision du temps est destinée à rendre les plus grands services.

Vents réguliers. — Sur le rivage de la mer, la brise souffle vers la terre pen-

dant le jour, et vers la mer pendant la nuit : la cause en est à l'inégale influence du soleil sur la terre et sur la mer, et à ce fait que l'air prend toujours la température de la surface qu'il touche. La mer, plus difficile à échauffer que l'air, se refroidit aussi moins vite.

Vitesse du vent. — La vitesse du vent se déterminait autrefois par une girouette munie de ressorts : l'appareil était grossier et inexact. La direction du vent était mal indiquée, car il a peu d'action sur la girouette lorsqu'elle est placée dans sa direction, et par suite la girouette restait indécise. Aujourd'hui, on se sert de l'anémomètre (mesure du vent), composé comme il suit. Aux extrémités de deux branches horizontales et perpendiculaires entre elles, sont appliquées des demi-sphères creuses, dont la concavité est tournée dans le même sens. L'effet du vent est plus grand sur la surface concave que sur la surface convexe, et le petit appareil se met à tourner toujours dans le même sens, quelle que soit la direction du vent. La vitesse de rotation mesure la vitesse du vent; pour enregistrer le nombre de tours, l'axe de rotation porte un doigt, qui, à chaque tour, fait avancer d'une dent une roue dentée horizontale, garnie de 200 dents. A chaque extrémité d'un diamètre de cette roue sont deux pointes saillantes, de sorte que, à tous les 100 tours de la girouette, une pointe se trouve en face du fil d'un électro-aimant; ce contact met en jeu une batterie : la batterie soulève un marteau qui retombe sur un papier se mouvant d'un mouvement uniforme, et y marque la place du choc. Suivant le rapprochement des coups de marteau sur le papier, on juge de la vitesse du vent.

Reste à noter la direction; la girouette ordinaire y est impuissante, comme nous l'avons vu; on la remplace par deux roues à aubes hélicoïdales tournées en sens inverse, de sorte qu'à la moindre variation l'instrument revient par une rotation dans la direction voulue. Toutes les dix minutes, il se produit un contact avec un électro-aimant, qui pointe la direction sur une feuille, où sont marqués les points cardinaux et leurs subdivisions en quarts et demi-quarts. A un moment donné, on connaît donc la direction et la vitesse.

Pluie. — Udomètre. — Les vents et la chaleur enlèvent à la mer et aux cours d'eau de la vapeur, que les courants d'air transportent sous forme de nuage. L'eau semble exister dans les nuages, comme dans la vapeur qui s'échappe d'une chaudière, à l'état de particules infiniment petites que montre le microscope, ou bien encore à l'état de vésicules. Les nuages obéissent à la pesanteur, ils tombent sans cesse, mais en tombant ils rencontrent souvent des couches non saturées qui reforment de la vapeur : le nuage fond pour ainsi dire à la partie inférieure, et se reforme dans les régions élevées. Quelquefois, l'eau arrive jusqu'au sol, et c'est la pluie : elle augmente ou diminue en route, suivant qu'elle rencontre des couches qui sont ou ne sont pas saturées.

Udomètre. — L'eau pénètre dans la cavité B, où elle est soustraite en partie aux influences atmosphériques : le bord du vase est taillé en biseau, de façon à recevoir l'eau qui tombe sur toute la section. Le tube vertical C donne la hauteur d'eau.

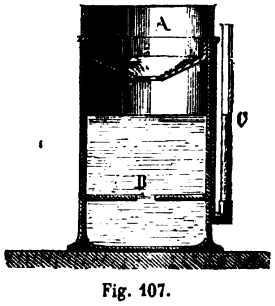


Fig. 107.

Épaisseur de la couche d'eau qui tombe à Paris pendant chaque saison.

Été.	0m 161
Automne.	0 122
Hiver.	0 107
Printemps.	0 174

Hauteur annuelle de la pluie dans quelques pays.

Paris.	0m 564
Bordeaux.	0 650
Madère.	0 767
La Havane.	2 320
Saint-Domingue.	2 730

La neige est de l'eau congelée pendant qu'elle se condense : si on la reçoit sur une planche recouverte d'une étoffe noire, on reconnait qu'elle est formée

Fig. 108.

de quantité de petites aiguilles prismatiques réunies en hexagones, et affectant les figures les plus variées, comme le montre le dessin.

Rosée. — Pendant le jour, le sol s'échauffe plus que l'air ambiant : pendant la nuit, le sol rayonne sa chaleur vers les espaces célestes, et se refroidit plus que l'air ambiant : la couche d'air au contact du sol se refroidit aussi, et ne peut plus maintenir en suspension toute la vapeur d'eau qu'elle renferme, d'où condensation partielle en gouttes d'eau qui se déposent sur les plantes. Le *brouillard* est dû à une cause analogue à celle de la rosée : le sol, où les cours d'eau échauffés par l'été émettent des vapeurs que l'air froid du matin ne peut dissoudre en entier, et une partie reste en suspension à l'état de nuage.

Les variations du baromètre sont dues aux variations de pression de l'atmosphère; chez nous, les vents secs, venus du nord-est, augmentent la pression et ont monter le baromètre; les vents humides, au contraire, venus de l'ouest, après avoir parcouru l'Océan, amènent la pluie et les dépressions. Il ne faut ajouter de confiance aux indications du baromètre qu'autant qu'elles sont progressives et se produisent lentement. Les grandes oscillations brusques indiquent la tempête. A l'équateur, le baromètre a des variations diurnes bien régulières, et présente deux maxima à dix heures du matin et à dix heures du soir, et deux minima à quatre heures du matin et à quatre heures du soir.

Température d'un lieu. — Elle varie avec la latitude, c'est-à-dire avec l'angle de la verticale du lieu et de l'équateur; en effet, quand la latitude augmente, l'inclinaison des rayons solaires augmente et la chaleur reçue diminue. L'altitude des lieux diminue la température : Mexico, qui est à 2,000 mètres d'altitude, est très-froid; sur les montagnes, règnent des neiges éternelles. Le voisinage des mers élève la température, puisque les vents, chargés d'humidité, en abandonnent beaucoup, et l'eau, revenant à l'état liquide, dégage sa chaleur

latente. Ainsi la France est plus chaude que la Hongrie : les vents d'ouest qui arrivent en Hongrie lui enlèvent de l'eau au lieu de lui en donner, parce qu'ils sont desséchés. De plus, les nuages, au voisinage de la mer, protégent le sol et en

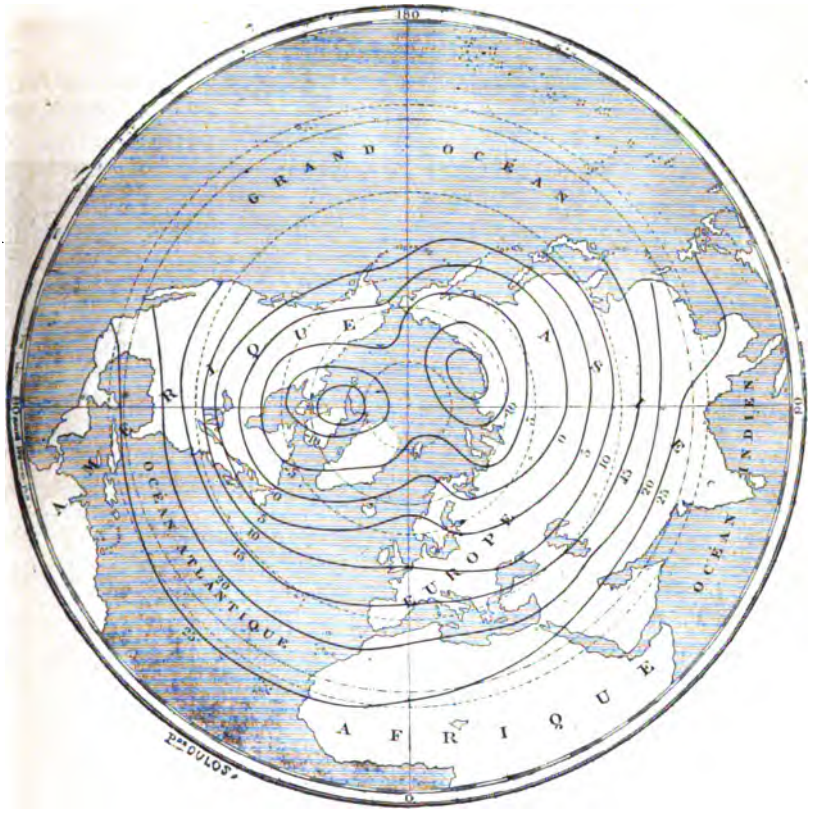


Fig. 109.

empêchent le rayonnement vers le ciel. La figure ci-contre, où sont marquées les courbes d'égale température de 5° en 5° (lignes isothermes de de Humboldt), montre bien les influences dont nous venons de parler.

TEMPÉRATURE MOYENNE EN DIVERS LIEUX DU GLOBE

Pays.	Latitudes.	Températures.	Pays.	Latitudes.	Températures.
Abyssinie	15°	+ 31°,0	Genève	46°	+ 9°,7
Sénégal (Saint-Louis)	16°	+ 24°,6	Mont Saint-Gothard	46°	+ 1°,0
Jamaïque	18°	+ 26°,1	Paris	49°	+ 10°,8
Mexico	19°	+ 16°,6	Strasbourg	49°	+ 9°,8
Le Caire	30°	+ 22°,1	Bruxelles	51°	+ 10°,2
Constantine	36°	+ 17°,2	Londres	52°	+ 10°,4
Pékin	40°	+ 12°,7	Moscou	55°	+ 3°,6
Naples	41°	+ 16°,7	Stockholm	59°	+ 5°,6
Constantinople	41°	+ 15°,7	Saint-Pétersbourg	60°	+ 3°,5
Boston	42°	+ 9°,3	Mer du Groenland	70°	— 7°,7
Marseille	45°	+ 14°,1	Ile Melvil	76°	— 18°,7

CHAPITRE IV

NOTIONS SUR LE MAGNÉTISME, L'ÉLECTRICITÉ ET L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

Aimants naturels et artificiels. — Magnétisme terrestre. — Aiguille aimantée ; boussole. — Machine électrique. — Électrophore. — Bouteille de Leyde. — Électricité atmosphérique ; effets de la foudre ; paratonnerre. — Pile voltaïque. — Effets physiques et chimiques des courants. — Action réciproque des courants et des aimants. — Multiplicateur. — Électro-aimants. — Principes de la télégraphie électrique.

Magnétisme. — Certains corps naturels (l'oxyde de fer, par exemple, le *magnes* des anciens) et certains corps artificiels ayant subi des actions particulières (l'acier, par exemple), ont la propriété d'attirer le fer. Les premiers sont les aimants naturels, les seconds, les aimants artificiels. La science qui s'occupe de ces corps, de leur nature, et des actions qu'exercent sur eux les masses environnantes, cette science est le magnétisme.

Fig. 111.

Aimants naturels et artificiels. — A est un morceau d'oxyde salin de fer (que l'on rencontre surtout dans les minerais de Norwége) ; il est garni d'une armure de fer, et supporte le morceau de fer P : pour les séparer, il faut un certain effort.

Fig. 110.

Le fer à cheval AMB, formé de lames d'acier aimanté artificiellement, soutient le poids F et le petit vase qui lui est suspendu.

L'attraction magnétique est réciproque, et, le fer doux est attiré par un aimant fixe, de même que celui-ci vient s'appliquer sur un morceau de fer fixe. Elle s'exerce à distance et à travers les corps (une feuille de papier ou de bois, par exemple) ; elle diminue et finit par disparaître pour ne plus revenir quand on chauffe un aimant jusqu'au rouge ; elle diminue très-rapidement avec la distance. Enfin, dans une carrière d'oxyde de fer magnétique, certains morceaux seulement présentent la propriété des aimants.

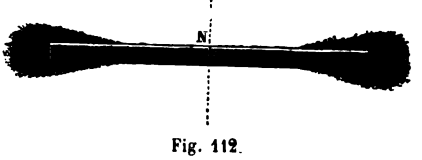


Fig. 112.

Si l'on a un barreau aimanté AB que l'on plonge dans la limaille de fer, les parties extrêmes possèdent seules la propriété magnétique : elles se garnissent

de houppes de limaille, tandis qu'au milieu il n'y a plus rien, l'adhérence est nulle. Les houppes sont formées de petits morceaux de limaille placés à la suite les uns des autres : chacun d'eux joue, par rapport à ses voisins, le rôle d'un nouvel aimant; nous verrons, en effet, que l'on peut se procurer des aimants artificiels par le contact du fer ou de l'acier avec un aimant naturel. Les régions d'adhérence et d'attraction maxima sont très-voisines des extrémités, leur centre est aux points A et B qu'on appelle pôles. Dans les aimants naturels, il existe quelquefois plusieurs centres d'attraction intermédiaires que l'on appelle points conséquents.

Pôles d'un aimant. — Nous venons de voir qu'un aimant possède une ligne neutre et au moins deux pôles. Nous allons en montrer les propriétés : un barreau aimanté, auquel on a l'habitude de donner la forme d'une aiguille, est suspendu ou supporté par un point fixe coïncidant avec son centre de gravité : on donne à cette aiguille toute facilité de se mouvoir; par exemple, on la fait reposer sur une pointe d'acier par l'intermédiaire d'une chape d'agate. On reconnaît alors qu'elle prend une direction déterminée en chaque point du globe, direction qui s'écarte peu de celle du méridien du lieu. Cette aiguille possède deux pôles : l'un d'eux est toujours dirigé vers le nord, c'est le pôle nord, l'autre est le pôle sud. La moitié de l'aiguille qui se tourne vers le nord est ordinairement peinte en bleu.

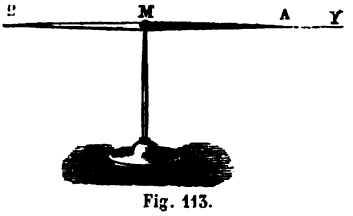


Fig. 113.

Si l'on a deux aiguilles aimantées, que l'on en enlève une de son pivot pour en présenter chaque extrémité aux extrémités de l'autre, on constate ce fait curieux que les pôles de nom contraire s'attirent et les pôles de même nom se repoussent.

Ayant un barreau aimanté qu'on ne peut suspendre, il sera facile d'en reconnaître le pôle nord et le pôle sud, d'après l'action que ses extrémités exercent sur l'aiguille aimantée : le pôle nord, par exemple, est à l'extrémité qui repousse le pôle nord de l'aiguille. On peut de la sorte donner des noms aux pôles de tout aimant, et l'on reconnaît alors que la loi d'attraction et de répulsion s'applique à tous les aimants.

Les pôles de même nom se repoussent : les pôles de nom contraire s'attirent. Ainsi, deux barreaux aimantés, accolés l'un à l'autre de façon à présenter à une extrémité de l'ensemble leurs pôles de nom contraire, se détruisent l'un l'autre et n'attirent plus un morceau de fer qu'on met presque en contact avec eux.

Aiguille aimantée. — Hypothèse de l'aimant terrestre. — L'aiguille aimantée s'oriente dans une direction fixe, nous venons de le voir. A quoi tient cette orientation constante? L'expérience suivante nous permettra de le supposer.

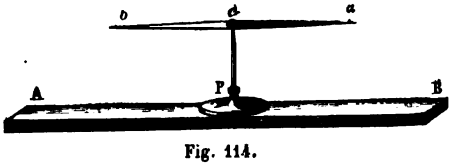


Fig. 114.

Plaçons une aiguille aimantée au-dessus d'un aimant puissant AB, nous verrons aussitôt l'aiguille se mouvoir et prendre une position parallèle au barreau, les pôles de nom contraire A*b*, *a*B se plaçant en face l'un de l'autre. De cette expérience naquit l'idée de l'hypothèse d'un aimant terrestre parallèle à la direction de l'aiguille aimantée et possédant un pôle nord et un pôle sud, et comme notre hémisphère est l'hémisphère boréal, on appelle le pôle nord de l'aimant terrestre

pôle boréal ; le pôle sud sera le pôle austral. Par analogie avec cet aimant hypothétique, sachant que les pôles de nom contraire s'attirent, nous dirons que le pôle nord (*a*) de l'aiguille aimantée est un pôle austral, et le pôle sud *b* un pôle boréal. Cette explication si simple n'est pourtant pas démontrée : il faut absolument ne l'accepter que comme une manière commode de dire les choses ; gardez-vous bien de croire à l'aimant terrestre, c'est encore une de ces hypothèses destinées à disparaître avec les progrès de la science.

Avant de nous occuper de l'aiguille aimantée et de ses applications (la boussole), achevons ce que nous avons à dire sur les propriétés et la production des aimants.

Action d'un aimant sur le fer doux. — Soit un morceau de fer doux *ab*, approchons-en les deux pointes d'une aiguille A'B', toutes deux sont attirées. Par exemple, le pôle austral A' est attiré vers (*a*) ; à ce moment approchons de (*b*) le pôle austral A d'un barreau aimanté, nous verrons aussitôt l'aiguille A' s'éloigner de (*a*) comme poussée par une force invisible. Voilà ce qui arrive et comment on explique les choses : il y a dans un aimant deux fluides : le fluide austral et le fluide boréal, qui peuvent se neutraliser l'un l'autre, mais qui, si les molécules sont orientées d'une certaine façon, s'accumulent aux deux extrémités parce que les fluides de nom contraire s'attirent et les fluides de même nom se repoussent. Le fluide austral accumulé en A décompose le fluide neutre du fer doux, attire le fluide boréal en (*b*), et repousse le fluide austral en (*a*) ; alors, comme en A' se trouve aussi du fluide austral, il est nécessaire que *a* et A' se repoussent. Je n'insisterai pas sur cette conception plus ou moins ingénieuse.

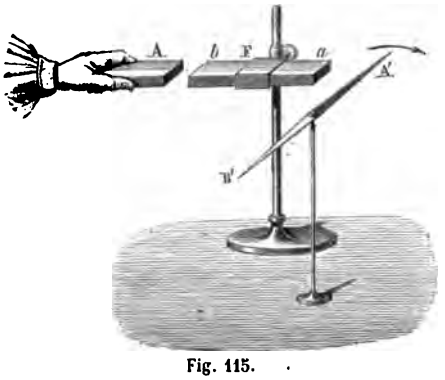


Fig. 115.

Force coërcitive. — Le fer doux *ab* est donc devenu à son tour un véritable aimant. On peut encore le voir par l'expérience suivante : à un morceau de fer doux qui adhère à un aimant, on peut en faire adhérer d'autres F' F''... Mais que l'on vienne à séparer F, immédiatement les autres morceaux se détachent les uns des autres. Au contraire, un morceau d'acier ou de fer, même légèrement aciéreux, devient lui-même un aimant au contact prolongé d'un autre aimant. Nous définirons ce fait en disant que l'acier a une force coërcitive qui n'existe pas dans le fer doux ; le premier conserve la trace du phénomène quand la cause a disparu ; le second voit disparaître l'effet en même temps que la cause.

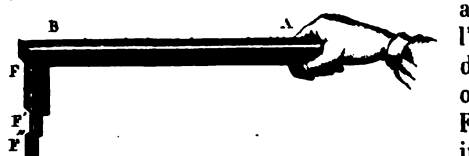


Fig. 116.

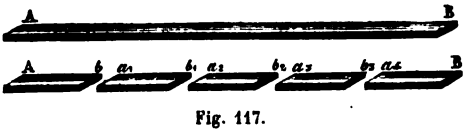


Fig. 117.

L'orientation des molécules du corps de façon à présenter d'un côté le fluide austral, de l'autre le fluide boréal, se concevait à la rigueur quand

on considérait l'expérience de l'aimant brisé. Si l'on prend un barreau aimanté, qu'on le rompe en un nombre quelconque de parties, chaque partie constitue un nouvel aimant dont les pôles sont orientés comme ceux du barreau.

Méthodes d'aimantation. — 1° *Simple touche.* — A la suite d'un barreau aimanté dont le pôle est A, on place un barreau d'acier; le fluide neutre de ce barreau est décomposé, et au bout de quelque temps il s'est formé un pôle boréal en B', un pôle austral en A'; celui-ci est moins énergique que B', et la ligne neutre est plus rapprochée de A'. Cet effet s'explique bien par l'hypothèse des deux fluides.

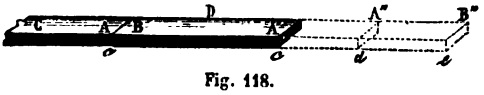


Fig. 118.

2° *Simple touche avec friction.* — Sur un barreau d'acier AB, on promène l'extrémité d'un aimant en frottant toujours dans le même sens; il est clair qu'on tend à produire ainsi une orientation fixe des molécules, et l'on arrive à faire un aimant du barreau d'acier AB.

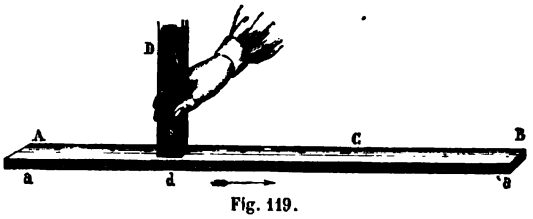


Fig. 119.

3° *Touche séparée.* — Le barreau d'acier A'B' repose sur les pôles de nom contraire A et B de deux aimants; à son milieu, on applique deux autres aimants A''B'', inclinés à 25° environ, et disposés de telle sorte que le pôle austral A'' corresponde au pôle austral A et B'' à B; on écarte l'un de l'autre les barreaux A'' et B'', et chacun d'eux frotte une moitié du barreau d'acier; arrivé aux extrémités de ce barreau d'acier, on revient au centre, sans jamais frotter en sens contraire. Il y a ici orientation énergique des molécules, et on arrive vite à produire un aimant.

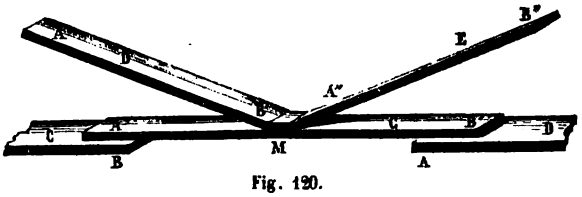


Fig. 120.

4° *Double touche.* — On sépare les deux barreaux A''B'' par un taquet en bois, et on promène tout le système sur le barreau d'acier de gauche à droite et de droite à gauche.

5° Enfin, nous dirons qu'en laissant longtemps un barreau d'acier dans la direction du méridien magnétique, c'est-à-dire dans une position parallèle à celle de l'aiguille aimantée, le barreau d'acier finit par devenir un aimant.

Aiguille aimantée. Déclinaison. Inclinaison. — Nous avons vu que l'aiguille aimantée prenait une direction fixe, à peu près celle du nord au sud; écartée de cette position, elle y revient par une série d'oscillations. Nous avons expliqué tout cela par l'hypothèse de l'aimant terrestre. Il nous reste à dire les usages de l'aiguille aimantée.

Déclinaison. — L'aiguille aimantée est dans un méridien, c'est-à-dire dans un grand cercle de la terre qu'on appelle méridien magnétique; en chaque lieu, on considère en outre le méridien astronomique, c'est-à-dire le grand cercle qui passe par le lieu et par l'axe de rotation de la terre qu'on appelle ligne des pôles. Le méridien magnétique ne coïncide pas avec le méridien astronomique: leur

angle est la déclinaison du lieu. Les pôles de l'aimant terrestre ne coïncident donc pas avec les pôles géographiques de la terre.

Si l'on considère la méridienne d'un lieu NS (trace du méridien sur le sol) et la méridienne magnétique (direction de l'aiguille aimantée), que l'on prenne l'angle de la projection horizontale de l'aiguille avec la méridienne NS, on a l'angle formé par les deux méridiens eux-mêmes, c'est-à-dire la déclinaison. Suivant que, pour un observateur regardant le nord, l'aiguille est à droite ou à gauche du méridien qui passe par son centre, la déclinaison est orientale ou occidentale.

La déclinaison de l'aiguille aimantée varie avec le temps, comme le montre le tableau suivant :

DÉCLINAISONS OBSERVÉES A PARIS

Dates.	Déclinaisons.	Dates.	Déclinaisons.
1580.	11°30′ déclinaison orientale.	1785.	22°
1618.	8°	1813.	22°28′
1663.	0°	1814.	22°34′
1678.	1°30′ déclin. occidentale.	1825.	22°22′
1700.	8°10′	1830.	22°12′
1780.	19°55′	1850.	20°30′

Ce sont les variations séculaires ; il existe en outre des variations diurnes régulières, dont l'amplitude est d'environ 15 minutes. La déclinaison varie avec les

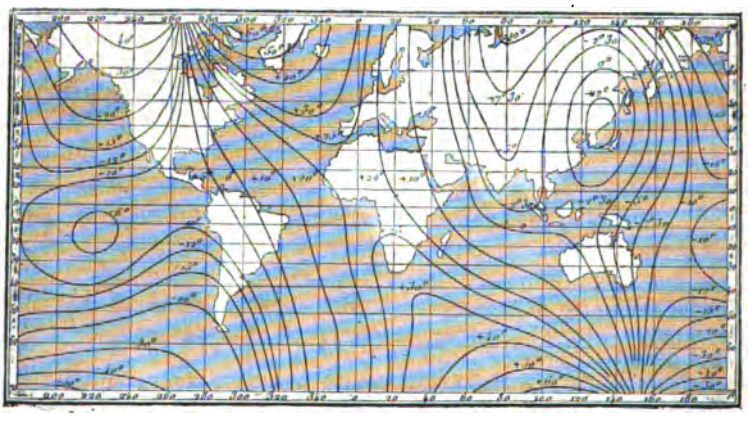


Fig. 121.

lieux : il y a des lignes sans déclinaison, sinueuses et irrégulières; il y en a deux au moins d'un pôle à l'autre. La figure ci-contre donne les lignes d'égale déclinaison.

Enfin, on constate des perturbations accidentelles, souvent énergiques, qui coïncident avec les aurores boréales, les orages et les éruptions volcaniques.

Inclinaison. — Si l'on suspend une aiguille aimantée par son centre de gravité au moyen d'un axe bien mobile, et qu'on la place dans le plan du méridien magnétique, cette aiguille fait avec la partie de l'horizontale dirigée vers le nord un angle que l'on appelle inclinaison. L'inclinaison, constante pour un même lieu, augmente à mesure que l'on s'approche du pôle ; il est un point dans les

mers boréales de l'Amérique septentrionale, dans ces mers où le courageux Gustave Lambert voulait se frayer un passage, il est un point où l'inclinaison est de 90°. C'est le pôle magnétique boréal; le pôle austral est dans les mers du Sud, au delà de l'Australie. L'inclinaison d'un lieu varie avec le temps; à Paris, elle diminue de trois minutes par an.

Quand on met le plan de la boussole d'inclinaison en dehors du méridien magnétique, l'inclinaison augmente jusqu'à ce que l'on soit dans un plan perpendiculaire à l'aiguille aimentée ordinaire, alors l'aiguille d'inclinaison est verticale.

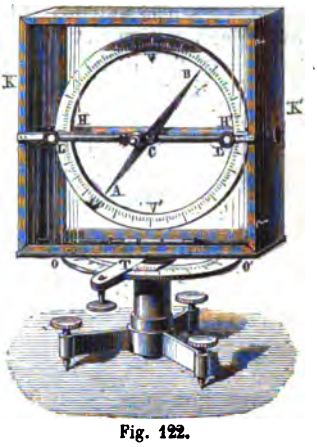


Fig. 122.

Boussole marine. — La boussole de déclinaison est précisément la boussole marine, le compas des marins. Elle est suspendue dans une boîte ou habitacle au moyen d'une suspension à la Cardan, pareille à celle que nous avons décrite pour le baromètre de Fortin. De la sorte elle ne participe point aux mouvements du vaisseau. L'aiguille repose sur une feuille de talc qui est éclairée pendant la nuit au moyen d'une lampe placée dans l'habitacle; le talc est transparent et le pilote a toujours sous les yeux les moindres variations de l'aiguille.

Fig. 123.

Sur la feuille de talc est marquée la rose des vents: elle se compose des quatre divisions nord, ouest, sud, est (N., O., S., E.), qui, partagées en deux, donnent quatre autres divisions (N.-O.), (S.-O.), (N.-E.), (S.-E.). Les huit divisions ainsi obtenues, partagées en deux parties, donnent huit nouvelles directions, qui sont par exemple, pour le quadrant nord-est, les lignes (N.-N.-E.), (E.-N.-E.) nord-nord-est, est-nord-est.

Les seize divisions obtenues sont encore partagées chacune en deux parties, et ces trente-deux parties constituent ce qu'on appelle les quarts de la rose des vents; on comprend, d'après cela, ce que veut dire (N. 1/4 E.) et (N.-N.-E. 1/4 N.) (ces deux directions coïncident). On tend un peu à abandonner ces dénominations pour se servir de la division en 360 degrés ou en 400 grades.

La masse de fer qui entre aujourd'hui dans les vaisseaux est une grande gêne pour l'usage de la boussole : on est arrivé à remédier à cet inconvénient au moyen du compensateur de Barlow.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Phénomènes électriques. — Un bâton de cire frotté avec de la laine, un morceau d'ambre (*electron* en grec), un bâton de verre frottés avec une peau de chat possèdent la propriété d'attirer les corps légers, des fragments de papier, par exemple, ou de petites boules de moelle de sureau. Tous les corps ne présentent pas cette propriété; ainsi, les métaux font exception. Le frottement n'est pas la seule cause qui développe dans les corps cette propriété attractive : toute opération mécanique produit le même effet; il arrive même, quand l'action a été énergique, que le corps soumis à cette action non-seulement attire les corps lé-

gers, mais encore émet à leur contact de bruyantes étincelles. L'électricité étudie tous ces phénomènes.

Tous les corps s'électrisent, même les métaux; ainsi une armature de laiton, portée par une tige de verre et frappée d'une peau de chat, prend des propriétés électriques. Cependant, un morceau de métal tenu directement à la main ne

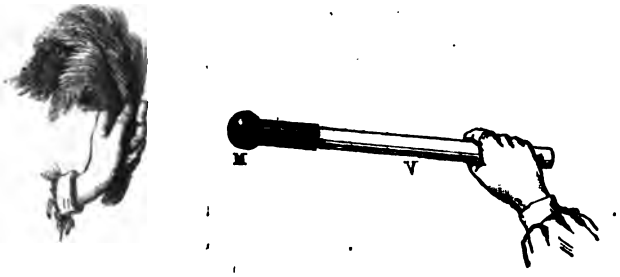


Fig. 124.

s'électrise pas, c'est que tout à l'heure nous l'isolions du contact de la main par une tige de verre. D'où deux grandes classes de corps : 1° les corps isolants ou mauvais conducteurs qui conservent l'électricité développée en un de leurs points ; 2° les corps conducteurs, tels que les métaux, le corps humain et la terre qui, électrisés en un point, laissent l'électricité se propager librement et disparaître, à moins que les corps conducteurs ne soient soutenus par des corps isolants.

Pendule électrique. — Petite balle de sureau suspendue à un fil. Approchez en un corps électrisé, la balle est attirée et vient au contact ; si alors, vous maintenez près d'elle le bâton électrisé, vous verrez que la balle de sureau est constamment repoussée. Or elle a pris par le contact l'électricité du bâton ; donc nous devons dire que les électricités de même nom se repoussent. C'est ici le cas de présenter l'hypothèse des deux fluides électriques : le fluide positif et le fluide négatif qui peuvent se neutraliser à quantités égales. L'électricité positive est celle que possède le verre frotté avec de la laine (on l'appela longtemps électricité vitrée) ; l'électricité négative est celle de la résine frottée aussi avec de la laine (électricité résineuse). Mettez la boule du pendule en contact avec le verre électrisé, elle est chargée d'électricité positive et repoussée : approchez-en maintenant le bâton de résine, elle sera attirée. Il est donc facile, d'après la définition précédente, étant donné un pendule chargé avec le verre, de classer les corps en deux grandes classes, 1° ceux qui sont électrisés positivement (ils repousseront le pendule), 2° ceux qui sont électrisés négativement (ils attireront le pendule).

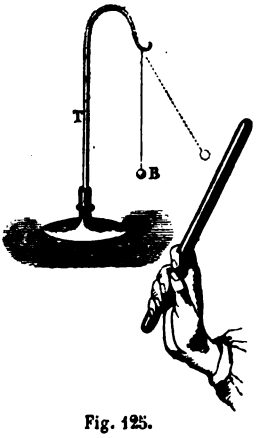


Fig. 125.

Les électricités de même nom se repoussent; les électricités de nom contraire s'attirent. Le fluide neutre est formé de quantités égales de chacun des fluides positif et négatif.

Dans le frottement, les deux corps s'électrisent en sens contraire : si le verre est positif, c'est que la laine a pris le fluide négatif. Un même corps peut prendre

l'un ou l'autre fluide suivant qu'il est frotté par tel ou tel corps ; — ainsi, frotté avec une peau de chat, le verre prend l'électricité négative.

Balance de torsion. — A un long de fil de platine est suspendu une baguette de gomme-laque garnie à une extrémité d'un morceau B de clinquant. — OA est une tige de verre portant une boule métallique A qui, mise en contact avec le corps à éprouver, prend à ce corps une quantité d'électricité proportionnelle à

Fig. 126.

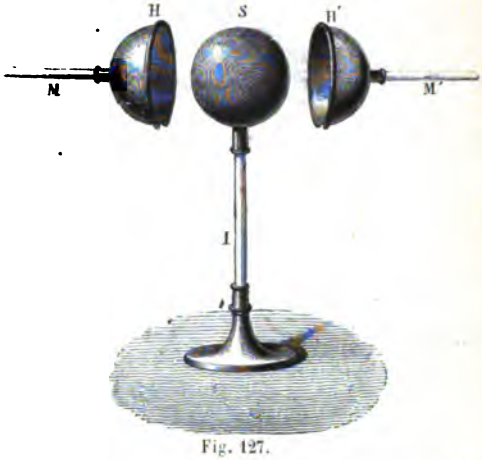


Fig. 127.

celle que le corps possède. Introduite dans l'appareil, la boule A repousse le disque de clinquant B ; l'angle d'écart que l'on peut lire sur le cercle graduè CC' mesure la force électrique. C'est avec cet appareil que l'on vérifie les deux lois suivantes :

1° Les répulsions et les attractions entre deux corps électrisés sont en raison inverse du carré de la distance ;

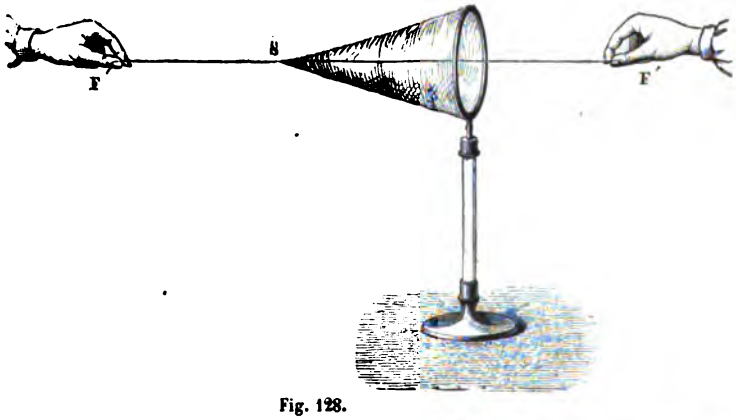


Fig. 128.

2° Elles sont proportionnelles aux quantités d'électricité que possèdent les deux corps.

L'électricité se porte à la surface des corps. — L'appareil ci-joint le montre bien : la boule S recouverte des deux hémisphères H et H′ est électrisée : enlevez les hémisphères, le pendule montre que chacun d'eux est électrisé ; mais la boule S ne l'est plus (*fig.* 127).

Autre expérience : sac conique de chanvre chargé d'électricité, le pendule montre qu'il est électrisé à l'extérieur et ne l'est pas à l'intérieur ; avec les deux

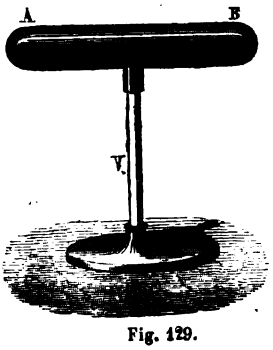


Fig. 129.

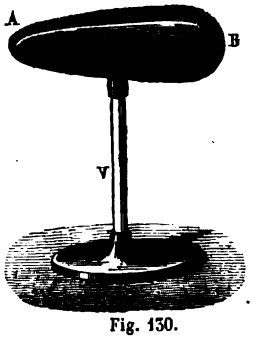


Fig. 130.

fils de soie FF′ (corps isolant) on retourne le sac, et l'on constate que l'électricité a changé de place pour revenir à la surface extérieure qui était tout à l'heure surface intérieure.

Accumulation de l'électricité sur les surfaces saillantes. — A la surface d'un corps, l'électricité n'est pas également répandue ; elle s'accumule sur les parties saillantes, où sa tension est maxima. Il est facile de le vérifier en chargeant d'électricité les deux appareils ci-contre, et les soumettant à l'analyse de la balance de torsion (*fig.* 129, 130).

Pouvoir des pointes. — La tension électrique augmente à un tel point sur

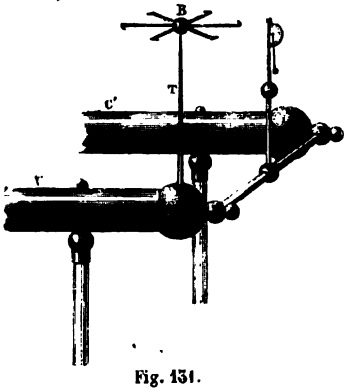


Fig. 131.

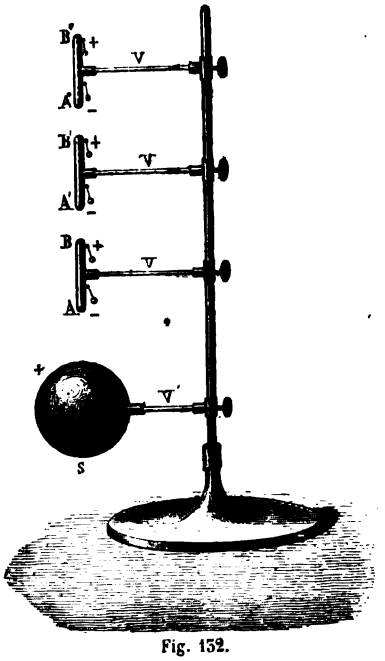


Fig. 132.

les parties saillantes devenues des pointes, que l'électricité ne peut être contenue et s'échappe. Sur le conducteur C d'une machine électrique, on place un tour-

niquet métallique à pointes B : l'électricité s'écoule, ainsi que le montre le petit pendule dont la balle de sureau, écartée de la verticale, y revient. L'air en contact avec les pointes est électrisé et prend le même signe que les branches du tourniquet ; il se produit une répulsion entre les deux fluides de même nom, et c'est ce qui explique le mouvement de rotation que prend le tourniquet.

Électricité par influence. — Supposez électrisée une boule métallique isolée S, et approchez d'elle un barreau métallique isolé, AB, aux extrémités A et B duquel sont de petits pendules électriques. Le fluide positif de S décompose le fluide neutre de AB, attire à lui le fluide négatif et repousse le fluide positif. Le corps AB est donc électrisé, en effet les deux pendules se soulèvent et on reconnaît en approchant un bâton de verre frotté avec de la laine, c'est-à-dire chargé positivement, on reconnaît qu'il y a du fluide négatif au pôle A et du fluide positif au pôle B. Le corps AB est dit électrisé par influence, et son fluide revient à l'état neutre, les pendules s'abattent dès que l'on décharge le corps S. Les signes + et — par lesquels on désigne les fluides positif et négatif sont très-commodes pour indiquer ce qui se passe. L'influence reçue par AB se transmet de même à A'B', et par A'B' à A"B" ; les pôles qui se regardent sont toujours de sens contraire (*fig.* 132).

Pouvoir des pointes. — Le conducteur C étant chargé, si on en approche une pointe AB, l'électricité de C disparaît instantanément ; en effet cette électri-

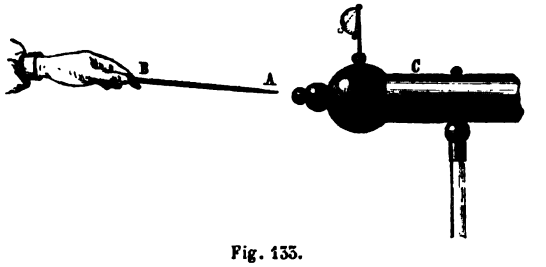


Fig. 133.

cité décompose le fluide neutre de AB, et attire à la pointe le fluide de nom contraire : celui-ci s'échappe aussitôt pour venir neutraliser le fluide de C, et ce conducteur est aussitôt ramené à l'état neutre.

Machine électrique ordinaire. — Un plateau de verre P (dont le diamètre atteint souvent $1^m,00$ à $1^m,20$) reçoit de la manivelle M un mouvement de rotation et passe à frottement doux entre deux paires de coussins KK', placés en haut et en bas du diamètre vertical du plateau. Ces coussins en cuir à la surface duquel est étendu de l'or mussif (bisulfure d'étain) chargent le plateau de verre d'électricité positive et se chargent eux-mêmes d'électricité négative : mais, communiquant avec le sol, ils sont sans cesse ramenés à l'état neutre. D'autre part le plateau P passe aux deux extrémités de son diamètre horizontal entre deux mâchoires F et F' garnies de pointes (*p. p*) : ces mâchoires sont le prolongement des conducteurs CC'. Voici ce qui arrive : le plateau chargé de fluide positif arrive entre les mâchoires, décompose le fluide neutre des conducteurs, attire le fluide négatif et repousse le fluide positif aux extrémités A et A'. Le fluide négatif attiré s'écoule par les pointes *p*, et se combine avec le fluide du plateau : celui-ci revient à l'état neutre, mais après un quart de rotation il passe entre deux coussins, se charge de nouveau d'électricité qu'il va abandonner aux autres pointes après un autre quart de rotation. De la sorte on voit que le fluide neutre des

conducteurs est décomposé et que finalement il ne reste plus sur ces conducteurs que du fluide positif. Le pendule R indique par son écart le moment où les conducteurs sont complétement chargés. Il est bien entendu que les conducteurs reposent sur des colonnes de verre : la chaîne T sert à mettre les coussins en communication constante avec le sol (*fig.* 134, 135).

Machines Armstrong. — Nous ne pouvons la passer sous silence. Une chaudière, isolée sur des pieds de verre, lance des jets de vapeur mélangée de gouttelettes d'eau par des ajutages en buis (*a*) : le frottement et le choc électrisent ces gouttelettes qui décomposent l'électricité neutre du peigne métallique (*v*) communiquant avec la boule B. La boule B se charge positivement, et la chaudière négativement, et l'on arrive à faire jaillir entre elles des étincelles de un mètre de longueur. Il est nécessaire que le vapeur soit humide et chargée de gouttelettes d'eau : il faut aussi des ajutages en buis pour obtenir le maximum d'effet (*fig.* 136).

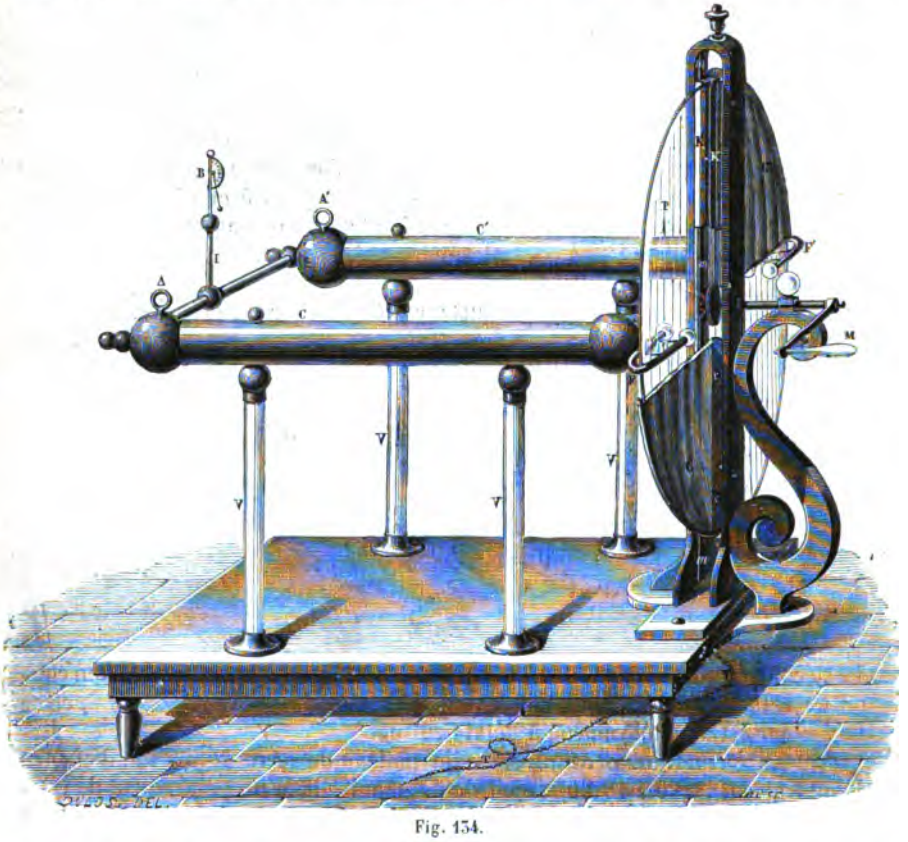


Fig. 134.

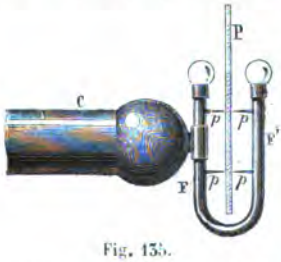


Fig. 135.

Électrophore de Volta. — C'est la machine électrique la plus simple. Dans un cylindre creux en bois on coule de la résine de façon à obtenir un gâteau FG. Sur ce gâteau s'applique

un plateau P en bois recouvert d'une feuille d'étain : ce plateau agit comme un plateau métallique, puisque l'électricité ne se porte qu'à la surface. Le plateau P est fixé à un manche isolant V. Avec une peau de chat, on bat le gâteau de résine de manière à produire en même temps un frottement : la résine se charge d'électricité négative. Sur le gâteau on pose le plateau métallique : son fluide neutre se trouve décomposé, le fluide positif attiré vers la résine, le fluide négatif repoussé à la face supérieure. Touchez cette face supérieure avec le doigt, le fluide négatif s'écoulera par vous dans le sol ; enlevez le plateau P et l'électricité positive dissimulée sur sa face inférieure se répand sur toute sa surface (*fig.* 137).

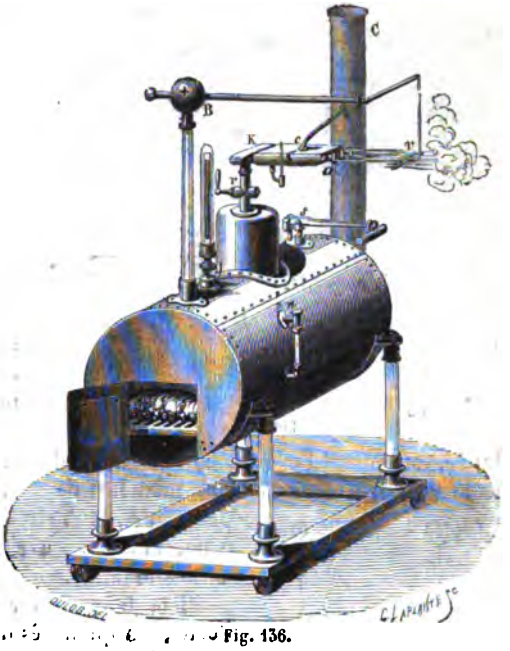


Fig. 136.

Bouteille de Leyde. — *Condensateur* (*fig.* 138). — On a deux plateaux, d'électrophore A et B, séparés par une lame de verre d'un diamètre plus grand. Le plateau A est mis par un point C en communication avec une source de fluide positif, et le plateau B communique avec le sol par le doigt D. Le fluide positif se répand sur A mais par influence il décompose le fluide neutre de B, et attire le fluide négatif, vers la lame de verre. La quantité de fluide négatif ainsi développée est moindre que la quantité de fluide positif possédée par A ; le fluide négatif de B attire près de la lame de verre une partie du fluide positif de A. L'excès de A sur B reste seul libre et produit une divergence du pendule (*a*) ; le pendule (*b*) reste en repos. Les deux quantités égales de fluide qui sont sur A et B près de la lame de verre ne manifestent plus leur action, c'est de l'électricité dissimulée. A peut donc recevoir de la source une nouvelle quantité d'électricité positive qui attirera encore une autre quantité de fluide négatif sur la surface de B appliquée sur la lame de verre. D'où une nouvelle quantité d'électricité dissimulée. La source fournira ainsi de nouvelles quantités de fluide, jusqu'à ce que la somme des quantités d'électricité, qui, a chaque fois, reste en excès sur A, soit égale à la tension de la source S.

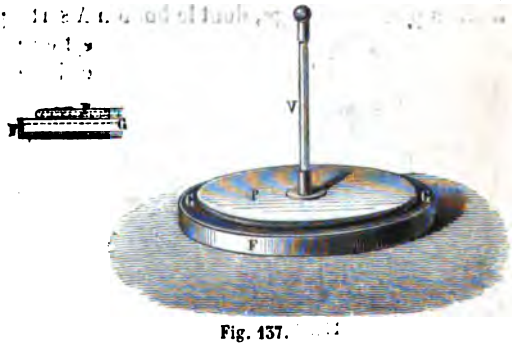


Fig. 137.

En réalité, le phénomène ne va pas par saccades : il est continu, et l'on voit que

de la sorte on a sur les deux plateaux des quantités souvent considérables d'électricité dissimulée. Il y a en outre un excès sur A ; si on touche A avec le doigt cet excès disparaît, le pendule (*a*) retombe ; mais le pendule *b* se lève parce qu'il n'y a plus assez de fluide positif sur A, pour maintenir tout le fluide négatif de B, et une partie de ce fluide devient libre : si avec le doigt, on le fait disparaître dans le sol, le pendule (*b*) retombe, mais le pendule (*a*) se lève parce qu'une partie du fluide positif de A devient libre. On peut ainsi pendant très-longtemps faire lever et retomber alternativement les deux pendules, et on arrive à décharger complétement l'appareil.

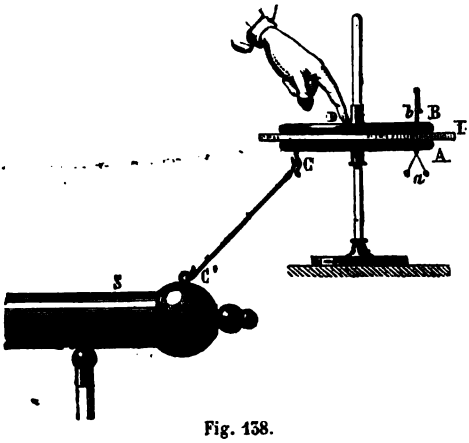


Fig. 138.

Si l'on veut une décharge instantanée, on prend l'excitateur à manche de verre : c'est un compas métallique, isolé de l'opérateur par des manches de verre ; on approche l'extrémité D du plateau A, et l'extrémité C de B ; dès qu'elle en est voisine, la décharge se fait d'un seul coup, et une forte étincelle jaillit.

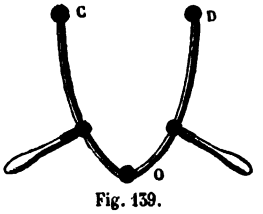


Fig. 139.

Si la lame de verre est mince, ou la charge très-forte, les quantités d'électricité dissimulée de chaque côté de cette lame deviennent assez considérables pour avoir la force de se recombiner à travers la lame de verre qui se trouve crevée.

Bouteille de Leyde. — C'est un condensateur, dont le plateau A est remplacé par des feuilles de clinquant chiffonnées et placées dans un flacon ; dans ces feuilles plonge une tige, dont le bouton A sert à produire des décharges. Le flacon est en partie entouré d'une feuille d'étain, qui ne doit point s'approcher trop près du bouton A pour éviter une décharge accidentelle. Le col du flacon est garni de cire-résine pour le même motif. La bouteille est suspendue aux conducteurs de la machine électrique par son crochet, et l'appareil se charge rapidement (*fig.* 140).

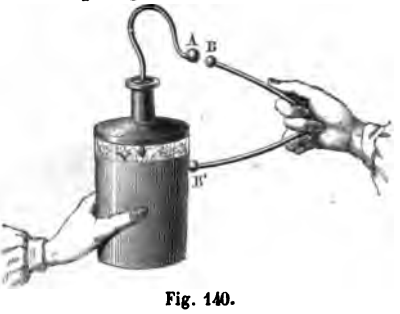


Fig. 140.

Quelquefois, la bouteille a simplement la forme d'un verre compris entre deux gobelets métalliques. On reconnaît, au moyen de ces éléments mobiles, que l'électricité dissimulée s'est portée sur les deux faces du verre (*fig.* 141).

La bouteille de Leyde est déjà un engin puissant, mais si vous réunissez plusieurs bouteilles ou bocaux analogues, de manière à faire communiquer entre elles les armatures intérieures, et aussi les armatures extérieures, vous obtenez une batterie électrique, dont l'effet est quelquefois terrible.

La figure 142 montre que si l'on place un fil métallique F entre deux pinces A et A', la pince A communiquant par une chaîne avec l'armature extérieure de la

batterie, et la pince A′ étant reliée par l'excitateur à l'armature intérieure, l'étincelle jaillit à travers le fil et le porte au rouge, quelquefois même le réduit en poussière oxydée.

Expériences diverses. — Entre les boules A et B communiquant avec l'intérieur et l'extérieur d'une bouteille de Leyde, on suspend une balle de sureau C; elle est attirée, puis repoussée par chacun des boutons, et oscille entre les deux jusqu'à ce que la bouteille soit déchargée (*fig.* 143).

Fig. 141.

La figure 144 montre que les deux pointes T et T′ communiquant, l'une

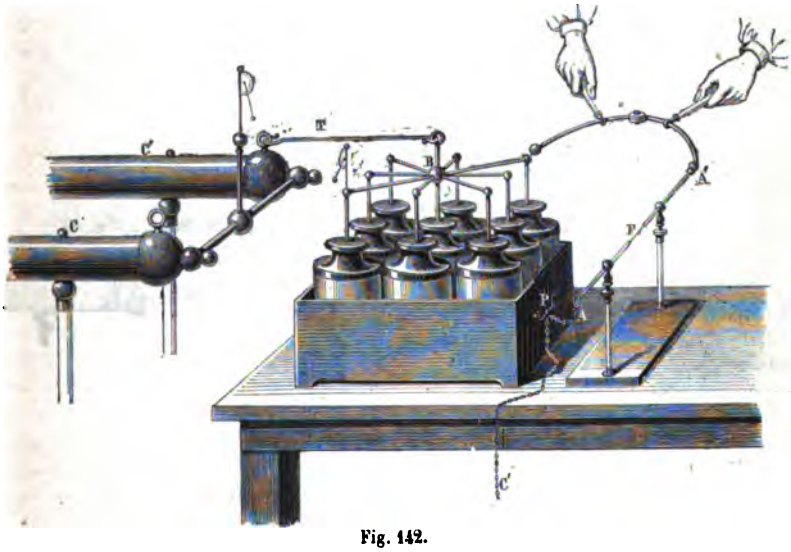


Fig. 142.

avec l'extérieur, l'autre avec l'intérieur d'une bouteille de Leyde, laissent jaillir entre elles une étincelle qui perce soit une carte, soit une lame de verre.

Dans un petit mortier de bronze est une couche d'éther; on fait jaillir une étincelle entre les tiges T et T′, et la boule B est projetée (*fig.* 145).

L'étincelle d'une machine électrique qui jaillit sur de l'éther contenu dans une cuillère enflamme cet éther (*fig.* 146).

De l'étincelle. — L'étincelle a la forme d'une ligne brisée analogue à l'éclair.

Dans le vide, l'étincelle qui jaillit entre deux boutons, s'étale et se répand, en produisant une lueur en forme de globe, c'est l'œuf électrique (*fig.* 148).

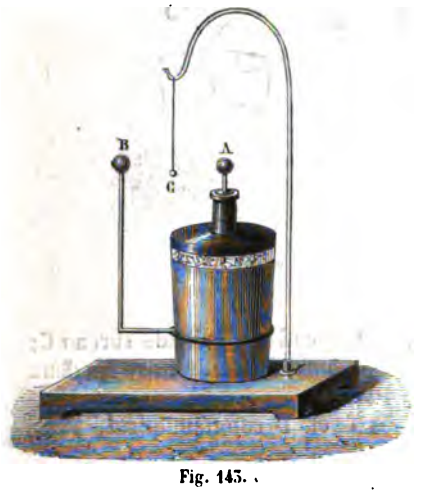


Fig. 143.

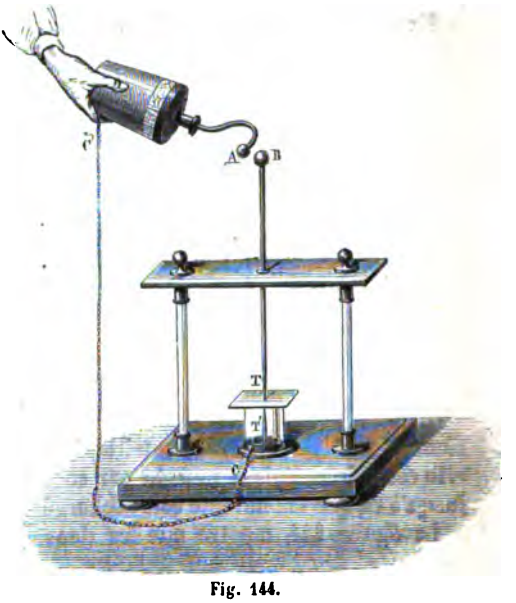


Fig. 144.

L'étincelle est de couleur variable, suivant le métal des boutons, et suivant le gaz raréfié à l'intérieur du globe : si la charge est très-forte, c'est l'influence du

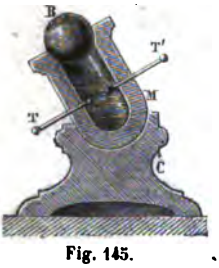


Fig. 145.

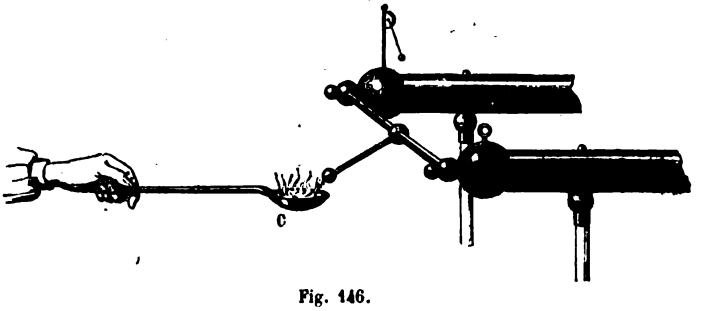


Fig. 146.

métal qui l'emporte. Avec l'argent et le cuivre, la lueur est verte; avec le bismuth et le fer, rouge; avec l'or, jaune. Dans l'air, la lueur est violette ainsi que dans l'azote; elle est bleue dans l'acide carbonique, et rouge dans l'hydrogène.

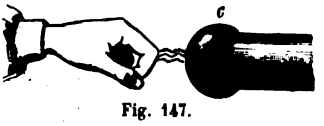


Fig. 147.

Électricité atmosphérique. — L'analogie entre l'étincelle électrique et l'éclair devait frapper l'esprit de tous les physiciens. Franklin, le grand citoyen de l'Amérique, imagina, un jour, de garnir de fer la pointe d'un cerf-volant, qu'il enleva dans les airs; la corde était terminée par une clef fixée elle-même par un cordon de soie à un arbre. La soie isolait la clef, et une pluie fine étant arrivée mouilla la corde du cerf-volant, et la rendit conductrice : à ce mo-

ment, on tira de la clef des étincelles. Franklin croyait avoir soutiré l'électricité du nuage : mais c'était le nuage électrisé qui avait décomposé le fluide neutre de l'appareil, attiré à lui par la pointe métallique le fluide contraire au sien, et repoussé dans la clef le fluide du même nom.

Pour faire l'expérience à coup sûr, il suffit de mêler à la corde du cerf-volant un fil conducteur métallique.

Nous avons dit déjà que presque tous les effets mécaniques produisaient de l'électricité. Les phénomènes de la vie animale et végétale, l'évaporation de tous les liquides, donnent naissance à de l'électricité. Dans les temps calmes, l'atmosphère est ordinairement chargée de fluide positif, et l'intensité est maxima dans les lieux élevés et isolés. Cette électricité n'est, du reste, sensible qu'à environ $1^m,50$ au-dessus du sol ; elle est plus forte en hiver qu'en été, maxima au lever et au coucher du soleil, minima à deux heures de l'après-midi et au milieu de la nuit. En temps calme, le sol est toujours électrisé négativement.

Fig. 148.

Toute vapeur qui se dégage est électrisée ; les nuages le sont donc, et leur signe est variable comme leur lieu de naissance. D'après cela, des attractions et répulsions se produisent entre les nuages ; quelquefois même, une décharge se produit entre les nuages avec l'accompagnement d'une étincelle (l'éclair) et d'une détonation (le tonnerre).

L'éclair est blanc s'il éclate près du sol, et violet s'il éclate dans les régions supérieures raréfiées ; ordinairement, il a la forme d'un zigzag : quelquefois, il paraît comme une vaste lueur ou comme un globe de feu. Il faut distinguer les éclairs de chaleur, dus sans doute à la réverbération d'éclairs qui se produisent au-dessous de l'horizon.

La lumière a une vitesse énorme (80,000 lieues par seconde) relativement à la vitesse du son (340 mètres par seconde) ; nous percevons l'éclair avant d'entendre le tonnerre, et l'intervalle peut mesurer la distance qui nous sépare de l'orage.

Quelquefois, la décharge se produit non pas entre deux nuages, mais entre un nuage et le sol. Le nuage décompose le fluide neutre du sol, et attire sur les points saillants (un arbre, un clocher) le fluide de nom contraire au sien ; si la tension devient trop forte, l'étincelle jaillit entre le nuage et le point saillant, et les effets de ce phénomène (la foudre) sont en grand ceux que nous avons vu en petit. Tout est détruit, percé, brûlé ; les animaux périssent instantanément, les métaux sont fondus, la boussole est affolée, le fer se change en aimant. Quelquefois même, on est frappé par ce qu'on appelle le choc en retour, bien que l'on soit loin de l'orage ; sous l'influence de l'orage, l'animal ou l'objet s'est électrisé contrairement à lui : aussitôt la décharge produite, le nuage revient à l'état neutre, il en est de même de l'objet ; il y a donc une brusque secousse, qui peut amener les plus graves désordres. L'air que traverse la foudre s'élec-

trise; il s'y forme un corps odorant, que l'on pense être une modification de l'oxygène, l'ozone.

Paratonnerre. — Le paratonnerre est l'expérience de Franklin, mise en pratique; une pointe fournit au nuage un courant d'électricité contraire à la sienne, et celle-ci se trouve neutralisée. Nous empruntons la notice qui suit à l'excellent *Dictionnaire des arts et manufactures*, publié sous la direction de M. Ch. Laboulaye, ouvrage que nous aurons de temps en temps l'occasion de citer.

Fig. 149.

Les paratonnerres se composent d'une tige métallique pointue, qui s'élève dans l'air, et d'un conducteur qui descend de l'extrémité inférieure de la tige jusqu'au sol.

Les conditions nécessaires pour qu'ils puissent produire leur effet sont : 1° que la pointe de la tige soit bien aiguë; 2° que le conducteur communique parfaitement avec le sol; 3° que depuis la pointe jusqu'à l'extrémité inférieure du conducteur il n'y ait aucune solution de continuité; 4° que toutes les parties de l'appareil aient des sections convenables.

La tige d'un paratonnerre a environ $9^m,25$ de longueur; elle se compose habituellement de trois pièces ajustées bout à bout, savoir : une barre de fer de $8^m,60$, une baguette de laiton de 60 centimètres, et une aiguille de platine de 5 centimètres; leur ensemble forme un cône qui s'amincit régulièrement jusqu'au sommet, et dont la base a 5 centimètres de diamètre. L'aiguille de platine est soudée à la baguette de laiton avec de la soudure d'argent, et on enveloppe encore cette jonction avec un petit manchon de cuivre. La baguette de laiton se réunit à la barre de fer, au moyen d'un goujon qui entre à vis dans toutes deux; ce goujon est ensuite fixé dans chacune d'elles par deux goupilles à angle droit. Pour ajuster la tige au-dessus du bâtiment, on perce le toit, et on la fixe avec des brides ou des étriers solides, soit contre un poinçon, soit contre le faîtage.

Au bas de la tige, à 8 centimètres du toit, on soude une embase, destinée à rejeter l'eau. Un peu au-dessous de l'embase, sur 5 centimètres de longueur, la tige est cylindrique et parfaitement rodée pour recevoir un collier brisé à charnière, qui doit réunir la tige au conducteur. Ce dernier consiste, tantôt en une barre de fer carrée de 15 à 20 millimètres de côté, tantôt en un câble en fil de fer, qui descend jusqu'au sol. On soutient ce conducteur, au moyen de pattes appliquées sur la couverture et le long du mur, de manière à soulager le point

d'attache. Si l'on a à sa disposition un puits qui ne tarisse pas, ou si, avec une petite sonde, on peut atteindre une profondeur où l'eau soit permanente, il suffira d'y faire arriver le conducteur, en le divisant en plusieurs branches. Pour multiplier le contact, on mènera le conducteur au puits ou au trou par des tranchées creusées dans la terre, que l'on remplira ensuite avec de la braise de boulanger. On aura, de cette manière, le double avantage de préserver le fer de la rouille, et de le mettre déjà en contact avec cette braise, qui est un très-bon conducteur. On emploie avec succès du fer zingué, dit fer galvanisé, pour prévenir l'oxydation. Lorsque l'on n'aura pas d'eau, il faudra chercher au moins un lieu humide, et y mener le conducteur par une longue tranchée, dans laquelle il sera bien enveloppé de braise. On pourra même alors, pour plus de sécurité, former des tranchées perpendiculaires à la première, et plus ou moins longues, dans lesquelles on fera passer des ramifications du conduit.

Fig. 150.

L'expérience a démontré qu'une tige de paratonnerre de 9 à 10 mètres de hauteur, établie suivant les règles ci-dessus, garantit des effets de la foudre tout ce qui est autour d'elle dans un cercle de 20 mètres de rayon, c'est-à-dire à peu près double de sa hauteur.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

Galvanisme. — Les phénomènes qui précèdent nous ont montré l'électricité s'accumulant en certains points des corps où elle reste en repos ; c'était l'électricité statique. Nous allons entrer dans un autre ordre de phénomènes où l'électricité se conçoit comme une force sans cesse en mouvement dans les conducteurs qui la contiennent.

Le point de départ en est dans l'expérience faite en 1789 par le docteur Galvani pour étudier la constitution des grenouilles ; il avait passé un fil de laiton entre les nerfs lombaires (poitrines) et la colonne vertébrale : toutes les fois que l'autre bout du fil Z venait à toucher les muscles cruraux, c'est-à-dire la cuisse, le fragment de grenouille était agité de soubresauts convulsifs. Ces phénomènes disparaissaient une demi-heure après la mort de la grenouille. Galvani disait que ces soubresauts étaient dus à un fluide particulier (fluide galvanique) ; l'animal était comme une bouteille de Leyde dont les nerfs jouaient le rôle d'armature extérieure et les muscles celui d'armature intérieure.

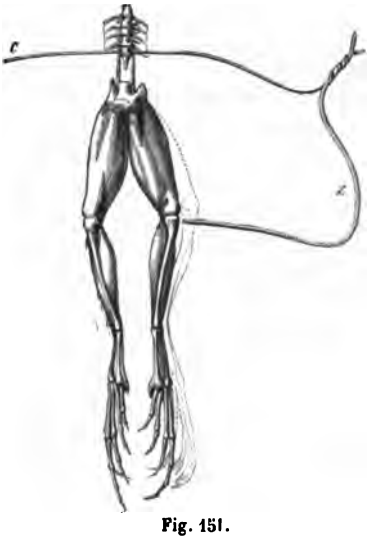
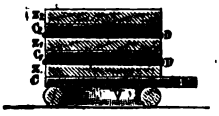


Fig. 151.

Volta cherchait la cause du phénomène dans l'arc métallique lui-même et dans les phénomènes qui se produisaient au contact du métal et de la matière animale. Il prétendait, ce qui était loin d'être démontré alors, que le contact de deux substances hétérogènes produit toujours de l'électricité.

La discussion s'engagea vivement entre Volta et Galvani, et elle eut pour ré-

sultat de montrer que les deux savants avaient raison. Il se produit de l'électricité dans les animaux, électricité variable suivant la texture particulière des parties considérées; mais il s'en produit aussi au contact de deux substances différant, soit par leur nature intime, soit par les conditions physiques où elles sont placées.



Pour se répondre, les deux contradicteurs entassèrent expérience sur expérience, et c'est à cela que nous devons la pile voltaïque.

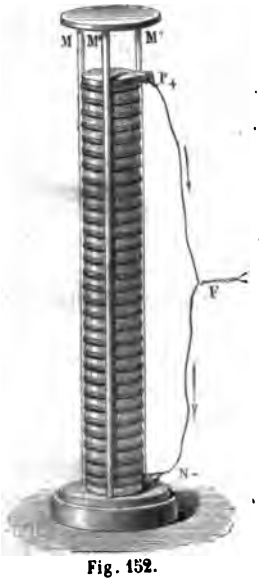


Fig. 152.

Pile de Volta. — Entre trois colonnes de verre s'élève une pile ou colonne formée de rondelles se succédant périodiquement dans l'ordre suivant : « Une rondelle de cuivre, une rondelle de zinc, une rondelle de drap trempé dans une dissolution faible d'acide sulfurique. » L'extrémité cuivre, celle du bas, mise par un fil conducteur en communication avec un condensateur, le charge d'électricité résineuse ou négative; au contraire, l'extrémité zinc, celle du haut, le charge de fluide vitré ou positif. La portion centrale de la pile ne donne pas d'électricité; la quantité d'électricité donnée par les pôles cuivre et zinc augmente avec le nombre des éléments ou groupes de rondelles. L'effet peut durer plusieurs heures, jusqu'à ce que les rondelles de drap aient perdu toute trace d'humidité. La tension augmente avec le diamètre de la pile; elle varie avec le liquide dont on humecte le drap. Le pôle cuivre est le pôle négatif, le pôle zinc est le pôle positif. Si on réunit les deux pôles par un circuit conducteur, il n'y a plus une décharge électrique instantanée, mais une décharge permanente, un courant d'électricité. Un courant est donc une recomposition continue des deux fluides électriques; on comprend, sans qu'il soit besoin de le dire, ce que c'est qu'un courant ou circuit fermé ou ouvert; on admet que le courant va dans les conducteurs ou rhéophores du pôle positif au pôle négatif, et dans la pile du pôle négatif au pôle positif.

En réalité, ce n'est point au fait même du contact qu'il faut attribuer la production de l'électricité dans les piles voltaïques; c'est toujours à une réaction chimique. Dans la pile à colonnes que nous venons d'étudier, c'est l'action du zinc sur l'acide sulfurique qui produit le courant.

Différentes espèces de piles. — 1° *Pile à auge, dite de Cruikshank.* — Les

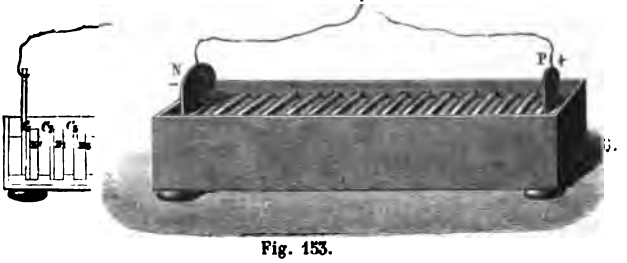


Fig. 153.

éléments cuivre-zinc sont réunis ensemble et on les plonge dans une auge remplie d'eau acidulée; entre chaque élément un intervalle libre laisse circuler le liquide.

C'est la pile de Volta rendue horizontale et plus commode. Quand la tension baisse, on la ravive par un renouvellement de l'eau acidulée.

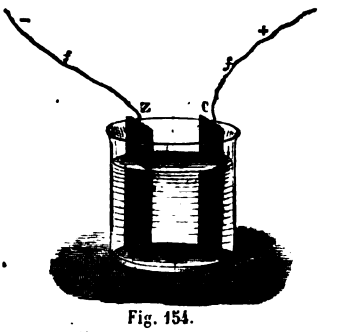


Fig. 154.

On reconnaît toujours les pôles d'une pile par le principe suivant : Connaissant le liquide, on sait toujours lequel des deux métaux est attaqué, et c'est sur celui-là que s'accumule l'électricité négative. Ainsi, avec l'acide sulfurique, le cuivre et le zinc, c'est le zinc qui est attaqué, et qui représente le pôle négatif.

2° *Pile de Wollaston.* — A une barre de bois sont suspendus des éléments cuivre-zinc plongeant chacun dans un vase rempli d'eau acidulée à l'acide sulfurique.

Chaque élément est formé d'une feuille de cuivre contournant une lame de zinc. La première lame-cuivre donne le pôle positif; la dernière lame-zinc donne

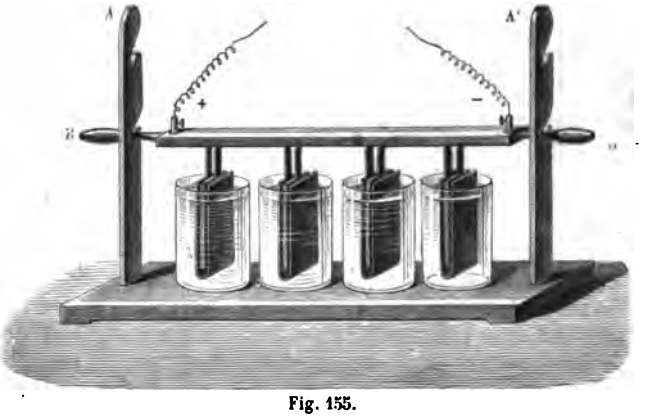


Fig. 155.

le pôle négatif. Quand la pile ne sert pas, on enlève les éléments hors du liquide, et l'on a de la sorte moins d'usure. Il est bon de ne pas oublier que le zinc d'un élément communique avec le cuivre du voisin par une tige deux fois recourbée à angle droit et accolée à la barre de bois.

Nous ne parlerons point des autres piles à un seul liquide (pile de Munch, de Smée), et nous arriverons immédiatement aux piles à deux liquides, qui ont sur les premières l'immense avantage de conserver longtemps un courant uniforme ; aussi les appelle-t-on piles à courant constant.

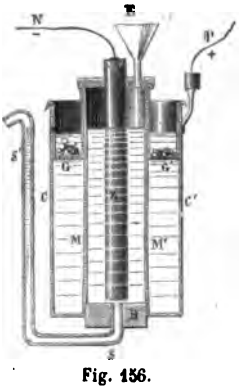


Fig. 156.

3° *Pile de Daniell.* — La feuille de cuivre forme un vase cylindrique CC', qui contient une solution de sulfate de cuivre toujours saturée par les cristaux GG' de sulfate reposant sur un grillage. Puis vient le vase MM' en terre de pipe, c'est-à-dire poreux : il contient l'eau acidulée ou du chlorure de sodium (sel marin), qui est décomposé par le zinc en donnant du chlorure de zinc. Dans le vase poreux est placé un cylindre creux en zinc Z, auquel correspond le pôle négatif N.

Qu'arrive-t-il ? Le zinc, en présence de l'acide sulfurique, décompose l'eau, en prend l'oxygène pour former du sulfate de zinc, et l'hydrogène se dégage. Maintenant le courant qui va du pôle zinc au pôle cuivre, traversant une solution de sulfate de cuivre, la décompose (nous le verrons plus loin) ; du cuivre se dépose sur le vase de cuivre CC', et de l'acide sulfurique avec de l'oxygène se trouve libre. A travers le vase poreux, l'acide sulfurique et l'oxygène passent, celui-ci rencontre l'hydrogène libre et il se reforme de l'acide sulfurique. Il y a décomposition de sulfate de cuivre, et les cristaux disparaissent peu à peu.

Les équations chimiques suivantes expriment le phénomène :

$$So^3 + Zn + Ho = ZnO,SO^3 + H \qquad CuO,SO^3 = Cu + O + SO^3.$$
$$O + SO^3 + H = SO^3Ho.$$

4° *Pile de Breguet, employée par l'administration des télégraphes.* — La figure montre bien la disposition de cette pile. — C'est absolument la précédente, légèrement modifiée. L'eau acidulée est remplacée par de l'eau ordinaire, qui n'attaque pas le zinc ; il n'y a usure que lorsque la pile fonctionne, parce qu'alors l'acide sulfurique du sulfate de cuivre décomposé traverse le vase poreux.

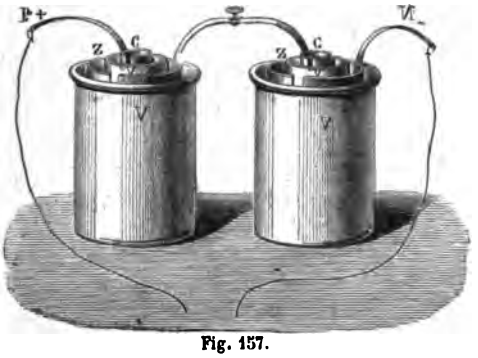


Fig. 157.

Si l'on veut éviter que le zinc soit attaqué, même lorsque la pile fonctionne, il suffit d'amalgamer le zinc (un amalgame est un alliage d'un métal avec le mercure) ; il est reconnu que, par ce moyen, le zinc s'use beaucoup moins tout en donnant naissance à un courant aussi fort.

5° *Pile Marié-Davy.* — L'inconvénient du sulfate de cuivre est qu'il filtre à travers le vase poreux, vient se décomposer au contact du zinc, sur lequel se dépose un peu de cuivre. Cela donne naissance à un courant de sens contraire au premier, et celui-ci est diminué. M. Marié-Davy emploie, au lieu de sulfate de cuivre, du sulfate de mercure, et, quand celui-ci traverse le vase poreux, il vient amalgamer le zinc, ce qui est une excellente chose.

6° *Pile de Bunsen.* — C'est la plus répandue. Dans un vase de terre on place de l'eau acidulée et une lame Z de zinc qui trempe dans ce liquide, puis un vase

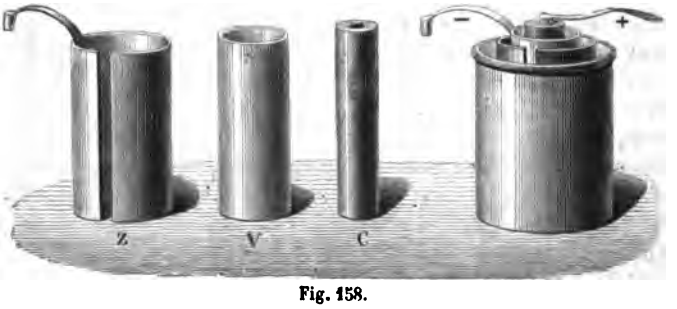


Fig. 158.

poreux V rempli d'acide azotique, dans lequel plonge un cylindre de charbon dur (charbon des cornues à gaz). On réunit les éléments par des feuilles métalliques

qui, fixées au zinc, se terminent par un cône de laiton enfoncé dans le charbon de l'autre élément. L'acide sulfurique, en présence du zinc, détermine une décomposition de l'eau, il se forme du sulfate de zinc et se dégage de l'hydrogène qui, travers le vase poreux, vient réduire un peu de l'acide azotique; il y a donc production d'acide hypoazotique, dont il est facile de reconnaître l'odeur quand on pénètre dans une pièce où il y a une pile de Bunsen.

Effets des piles. — 1° *Effets physiologiques.* — Nous les avons vus dans l'expérience de Galvani. Lorsqu'on prend en main les deux rhéophores ou électrodes d'une pile, si l'on a les mains un peu humides, le courant traverse le corps et l'agite de convulsions qui peuvent même donner la mort si l'appareil est puissant; les muscles se contractent, même chez les cadavres. On ne peut quitter les électrodes qu'autant que le courant est interrompu ; ils semblent être attachés aux mains.

2° *Effets mécaniques.* — Ce sont surtout des phénomènes de transport qui coexistent avec la plupart des autres.

3° *Effets calorifiques.* — Ils sont extraordinairement puissants. Des fils métalliques fins où passe un courant, sont portés au rouge, quelquefois même volatilisés. L'énergie de ces effets dépend plus de la surface que du nombre des éléments. Avec une pile de 600 éléments, M. Despretz est arrivé à ramollir le charbon.

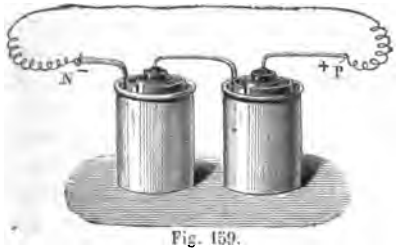


Fig. 159.

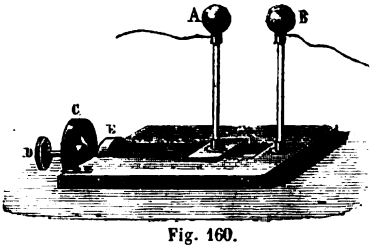


Fig. 160.

4° *Effets lumineux.* — En rapprochant les électrodes terminés à des boules A et B, on obtient une étincelle fort brillante, quelquefois même de véritables aigrettes lumineuses. Pour transformer cette étincelle en source de lumière fort brillante, il suffit de produire l'incandescence des conducteurs que suit le courant; il y a alors transport des matières solides du pôle positif au pôle négatif. Ainsi, en faisant jaillir l'étincelle entre deux charbons, on arrive à produire une lumière comparable à celle du soleil seul. Le charbon de bois brûle très-vite : on prend des baguettes de coke, qui durent plus longtemps; mais il y a transport de particules solides du pôle + au pôle —, et le premier se creuse en forme de champignon, tandis que le second conserve sa forme conique. Au bout de peu de temps, la distance augmente et la lumière diminue beaucoup; il fallait un mécanisme régulateur destiné à rapprocher sans cesse les charbons : M. Foucault l'a construit. Grâce à ce perfectionnement, la lumière électrique a été utilisée pour éclairer de grands ateliers où on travaille la nuit; on l'a appliquée aux phares, et les grands phares du Havre sont aujourd'hui éclairés par ce moyen.

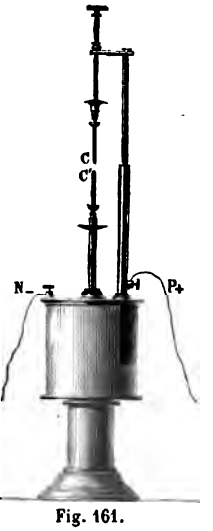


Fig. 161.

5° *Effets chimiques.* — Décomposition de l'eau par Carlisle et Nicholson, en 1800. — Sur les deux électrodes L et L′ reposent deux tubes remplis d'eau acidulée. Le courant est établi et traverse l'eau, on recueille au pôle + de l'oxygène et au pôle — de l'hydrogène, dont le volume est double de celui de l'oxygène. L'eau est donc formée de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène.

Fig. 162.

Tous les composés binaires, la potasse, la soude, sont décomposables comme l'eau. Davy prépara le potassium en creusant dans un morceau de potasse humide une cavité où il mit une goutte de mercure : le courant étant disposé comme le montre la figure, le mercure s'épaissit; il se forme un amalgame duquel on peut extraire le potassium par distillation (*fig.* 163).

Les sels aussi sont décomposés. Prenons un sel alcalin ou terreux, le sulfate de potasse par exemple, placé dans un tube en U; la dissolution, qui est neutre, est colorée en violet par du sirop de violettes. Au pôle positif, la dissolution rougit, l'acide sulfurique s'y est donc porté ; au pôle négatif, la dissolution verdit, la base potasse s'y est donc rendue. Ainsi, le sel est décomposé en acide et base : nous admettrons qu'il est décomposé en potassium et en acide sulfurique et oxygène ; le potassium se rend au pôle négatif, mais décompose l'eau instantanément et donne de la potasse ; l'hydrogène de l'eau décomposée s'unit à l'oxygène libre pour reformer de l'eau (*fig.* 164).

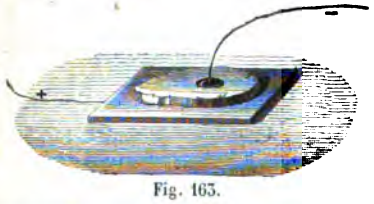


Fig. 163.

On fait l'hypothèse que nous venons de dire, parce qu'avec les métaux ni alcalins, ni terreux, le sulfate de cuivre, par exemple, c'est le métal seul, le cuivre, qui se dépose sur l'électrode négatif; il y a production d'acide sulfurique et dégagement d'oxygène au pôle positif. Le même effet se produit avec les sels d'or et d'argent. Tel est le principe de la galvanoplastie ; disons un mot de la dorure.

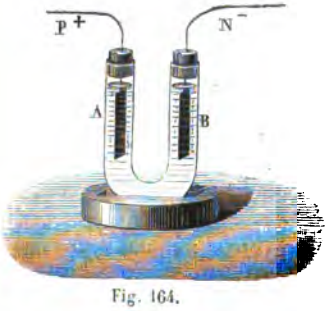


Fig. 164.

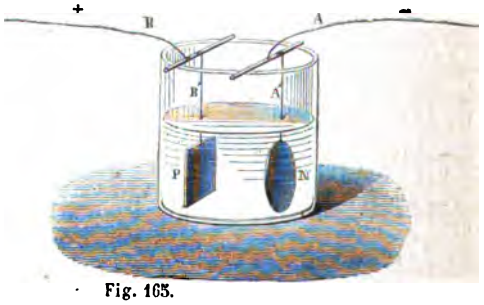


Fig. 165.

Galvanoplastie, dorure. — Au pôle négatif est placé l'objet à dorer N, lequel a été préalablement décapé en le portant au rouge et le trempant dans les acides, puis le lavant à l'eau distillée. Le bain renferme une dissolution de cyanure d'or ;

au pôle positif est attachée une feuille d'or P. Le courant passe, le cyanure d'or est décomposé, l'or se dépose sur l'objet N, et le cyanogène se porte au pôle positif, où il attaque la feuille d'or et reforme du cyanure. De la sorte, la dissolution se maintient théoriquement constante.

ACTION RÉCIPROQUE DES COURANTS ET DES AIMANTS

Expérience d'Œrsted. — En 1819, le Suédois Œrsted approcha d'une aiguille aimantée AB un fil donnant passage à un courant électrique FF′; le fil est placé

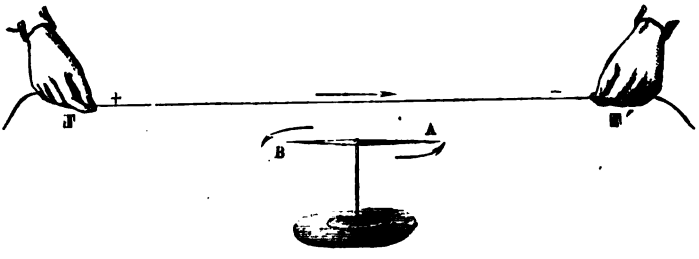


Fig. 166.

parallèlement au méridien magnétique et horizontalement au-dessus de l'aiguille. Il reconnut que l'aiguille est déviée de sa direction normale et tend à devenir perpendiculaire au courant. La déviation se produit toujours dans le même sens

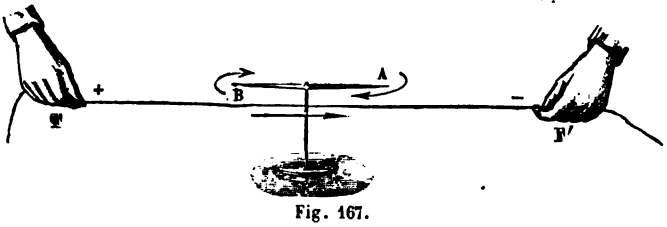


Fig. 167.

quand la direction du courant ne change pas, et elle est d'autant plus voisine d'un angle droit, que le courant est plus intense. Le courant étant au-dessus de l'aiguille et dirigé du sud au nord, le pôle austral A de l'aiguille est dévié vers l'ouest; le courant étant au-dessous de l'aiguille et dirigé du sud au nord, le pôle austral est dévié vers l'est.

Il est toujours facile de prévoir le sens de la déviation par la remarque suivante, due à Ampère : placez un petit personnage le long du fil, la face tournée vers l'aiguille, de telle sorte que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête, l'aiguille est toujours déviée vers la gauche de ce petit personnage.

L'expérience d'Œrsted amène immédiatement à concevoir l'identité des courants et des aimants, identité aujourd'hui démontrée.

Multiplicateur. — Galvanomètre. — L'expérience d'Œrsted permet de connaître la direction d'un courant par le sens de la déviation, et l'intensité par l'angle de déviation. Schweiger, en 1821, perfectionna le principe par la multiplication du courant; il s'arrange pour que le courant contourne l'aiguille, et l'on voit que, pour les quatre portions CD, DE, EF, FG, la gauche du bonhomme d'Am-

père est toujours du même côté du méridien magnétique; donc les quatre effets se superposent pour augmenter la déviation de l'aiguille.

L'invention des aiguilles astatiques perfectionna encore l'appareil; ce qui empêche la déviation de l'aiguille, c'est l'attraction de l'aimant terrestre, et il est évident qu'on annihilerait cette attraction avec un système de deux aiguilles AB, A'B' dirigées en sens contraire. L'attraction exercée sur le pôle A par la terre

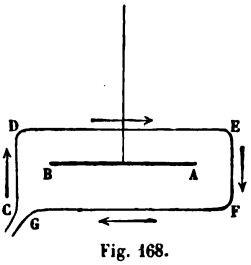


Fig. 168.

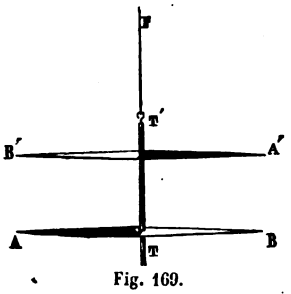


Fig. 169.

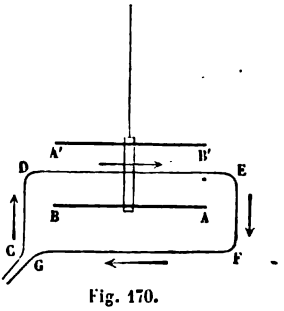


Fig. 170.

se trouve être détruite par la répulsion exercée sur B'. Il est bien entendu que le lien TT' rend les deux aiguilles parfaitement solidaires. Dans la pratique, une des aiguilles a toujours un excès de force sur l'autre, afin que l'ensemble, non soumis à l'influence d'un courant, se place dans le méridien magnétique.

Fig. 171.

Le système astatique augmente encore l'intensité de la déviation, car le courant CDEFG agit sur la seconde aiguille dans le même sens que sur la première AB; en effet, les actions de CD et EF, égales et de signe contraire, se détruisent; les actions de DE et FG sont de sens contraire, mais DE, plus rapprochée, l'emporte, et le petit bonhomme nous apprend qu'elle donne un effet de même sens que celui qui est produit sur AB. On ne se contente pas de faire faire un tour au courant autour de l'aiguille, on lui en fait faire plusieurs milliers, et on arrive de la sorte à mesurer l'effet de courants d'une minime intensité.

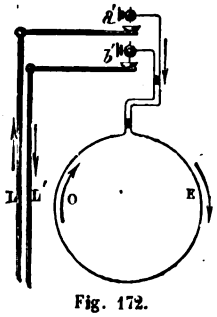


Fig. 172.

L'appareil usité a la forme indiquée par la figure 171 : les deux extrémités du fil viennent aux boutons (*a*) et (*b*), que l'on peut mettre en rapport avec les fils d'un courant quelconque.

L'expérience apprend que jusqu'à 20° les angles de déviation croissent proportionnellement à l'intensité du courant.

Lois de l'intensité des courants. — L'intensité d'un courant est constante en tous les points du circuit; elle est en raison inverse de la longueur du fil conducteur, en raison

directe de la section ou du carré du diamètre du fil, en raison directe de la conductibilité du métal qui compose le fil.

La terre est un aimant fixe, elle doit donc diriger les courants. En effet, soit le courant circulaire OE, mobile autour de l'axe $a'b'$ formé de deux pointes en acier reposant sur le fond poli de petites cuvettes pleines de mercure : le courant suit le chemin (L à EOb'L'), et, aussitôt qu'il passe, le plan du cercle se meut et tend à devenir perpendiculaire au méridien magnétique.

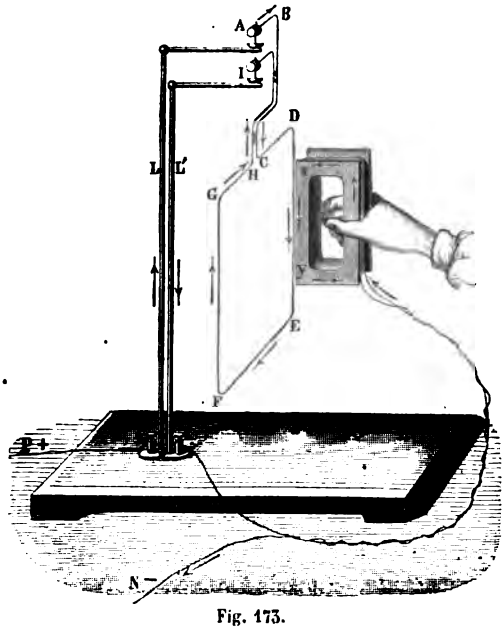


Fig. 173.

Action des courants sur eux-mêmes. — Nous ne pouvons la passer sous silence. Deux courants parallèles de sens contraire s'attirent, de même sens se repoussent. Deux courants faisant un angle s'attirent lorsque tous deux marchent vers le sommet de l'angle ou que tous deux s'en éloignent; ils se repoussent si l'un marche vers le sommet de l'angle, tandis que l'autre s'en éloigne.

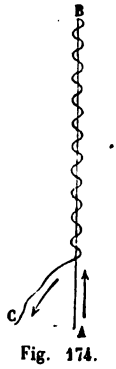


Fig. 174.

L'appareil précédent permet de le vérifier sans peine : le courant part du pôle positif, passe par la colonne L dans le rectangle mobile, où il suit les flèches, descend la tige L', passe dans le multiplicateur portatif XY et retourne au pôle négatif N. XY et DE sont deux courants de même sens, XY et GF sont des courants de sens contraire; en les inclinant, on a des courants angulaires. Et il est facile de démontrer les faits d'attraction et de répulsion démontrés plus haut.

L'action d'un courant sinueux BC, ou hélicoïdal, par exemple, équivaut à un courant rectiligne BA, projection du courant sinueux qui l'enroule. En effet, l'ensemble ABC est sans influence sur un courant parallèle; donc, l'effet de AB annule l'effet de BC. Il est bon de dire que le fil métallique ABC est entouré de soie, corps isolant : de la sorte, les deux courants voisins ne s'influencent pas l'un l'autre, théoriquement du moins, car pratiquement ils se nuisent généralement.

Solénoïdes. — Un solénoïde se compose de deux fils verticaux qui se replient horizontalement jusqu'en A et B, et qui reviennent de A et B pour se réunir au centre en décrivant une hélice dont le pas est très-petit, de sorte que l'on peut supposer les différentes spires remplacées par des cercles égaux et parallèles. Le courant rectiligne AB est annulé, comme nous venons de le voir, par l'ensemble du système qui l'entoure, et il ne reste plus à considérer qu'une grande quantité de petits courants circulaires, tous dirigés dans le même sens (*fig.* 175).

Expériences : 1° un courant horizontal amène le solénoïde dans une direction perpendiculaire à la sienne; 2° un courant vertical attire ou repousse, suivant que les parties des cercles voisines de ce courant sont traversées par un courant

de sens contraire ou de même sens que lui ; 3° les aimants agissent sur les solénoïdes comme sur d'autres aimants ; 4° la terre exerce sur les solénoïdes l'action directrice qu'elle exerce sur les aimants, d'où l'existence d'un pôle austral et d'un pôle boréal ; 5° chez les solénoïdes, comme chez les aimants, les pôles de même nom se repoussent, les pôles de nom contraire s'attirent.

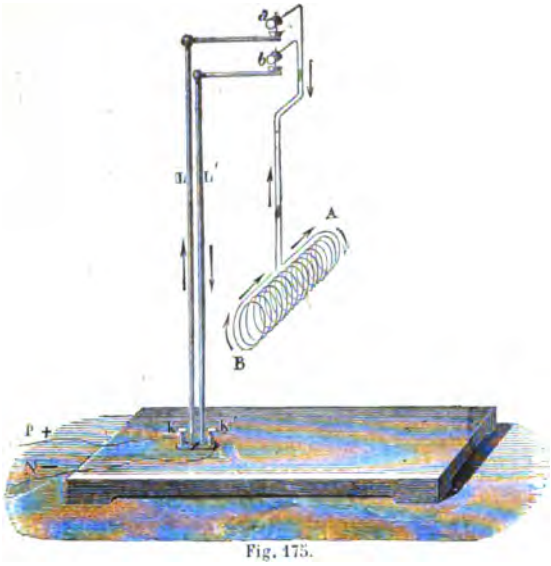


Fig. 175.

Partant de là, Ampère admet que les aimants sont de véritables solénoïdes et que les cercles égaux sont représentés dans les aimants par des courants de direction parallèle qui parcourent chaque molécule.

Électricité d'induction. — Nous en dirons quelques mots seulement pour faire comprendre la bobine de Ruhmkorff, une des plus belles applications de l'électricité.

Voici les faits qui en sont le point de départ :

1° Un courant qui commence fait naître dans un circuit voisin un courant de sens contraire, dit courant induit ;

2° Un courant qui finit fait naître dans un circuit voisin un courant de même sens ;

3° Un courant qui s'approche d'un circuit agit comme un courant qui commence, et un courant qui s'éloigne agit comme un courant qui finit.

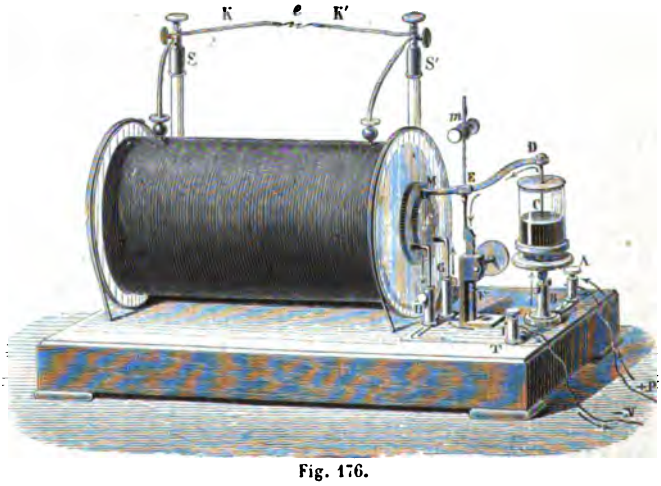


Fig. 176.

Les courants induits sont de faible durée ; il est possible de les produire au

moyen d'un aimant qui s'approche d'un circuit et s'en éloigne rapidement.

Dans la bobine de Ruhmkorff, deux fils sont enroulés et isolés sur une bobine, dans l'axe de laquelle est un cylindre de fer doux. Le fer doux, entouré d'un courant sinueux, prend aussitôt les propriétés d'un aimant (nous le verrons au prochain paragraphe). Si donc on fait passer un courant dans un des fils, ce courant va produire un courant induit dans le second fil ; il va changer le fer doux en aimant, et cet aimant produira lui aussi un courant induit sur le second fil ; enfin, les différentes spires de ce second fil produisent, en agissant l'une sur l'autre, d'autres courants induits. C'est ainsi que se produira dans le second fil un courant induit, somme des précédents, courant dont la puissance est souvent énorme.

Il est nécessaire que le courant inducteur soit à chaque instant rompu et rétabli, que le fer doux prenne et abandonne à chaque instant les propriétés d'un aimant pour que les courants induits soient continus, car nous avons vu qu'ils duraient fort peu de temps ; le petit appareil placé à droite de la figure a pour but de produire ces interruptions perpétuelles du courant inducteur.

La machine de Ruhmkorff est employée pour enflammer à distance les grandes mines ; dans la cartouche pénètrent les deux fils du courant induit et entre eux jaillit l'étincelle.

Électro-aimants. — L'aimantation résultait, d'après Ampère, d'une orientation des molécules du fer ; si l'on peut produire cette orientation avec un courant, on créera dès aimants.

Le fil de laiton que traverse un courant possède des propriétés magnétiques ; lorsqu'on l'approche de la limaille de fer, il s'en recouvre et les petites aiguilles de fer se placent en croix avec le courant.

Ampère plaça dans un tube de verre un barreau d'acier non aimanté AB, et autour du tube enroula en hélice régulière un fil de laiton recouvert de soie. Dès qu'un courant a traversé le fil, ne fût-ce qu'un instant, le barreau est aimanté. Chaque cercle de l'hélice, d'après Ampère, agit sur le barreau pour en orienter les molécules et transformer le fer doux ou aciéré en aimant. Car l'expérience réussit parfaitement aussi avec le fer doux, mais l'aimantation est fugitive et n'existe que tant que le fer doux est en présence du courant ; nous avons vu dans l'étude des aimants que le fer doux n'a pas de force coërcitive, c'est-à-dire que l'orientation de ses molécules y est en équilibre instable.

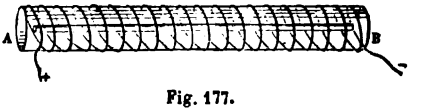


Fig. 177.

Le pôle austral est toujours à la gauche du courant ; il sera donc facile de prévoir la position des pôles en plaçant sur le fil le petit bonhomme d'Ampère. Suivant que l'hélice est dextrorsum ou sinistrorsum, c'est-à-dire s'enroule de gauche à droite ou de droite à gauche, on voit que le pôle austral est à l'extrémité par laquelle sort le courant ou à celle par laquelle il entre. Si l'enroulement change de sens en un point, l'aimant présentera un point conséquent à l'endroit correspondant.

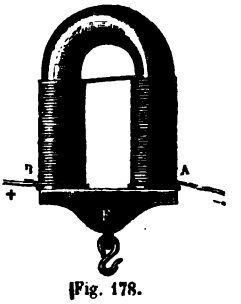


Fig. 178.

Le fer doux s'aimante d'une façon fugitive sous l'action d'un courant ; c'est avec lui que l'on forme les électro-aimants, dont le type est donné par la figure ci-jointe : autour d'une lame de fer doux courbée en U s'enroule un fil de laiton

recouvert de soie; l'hélice de l'une des branches passe sur l'autre, de telle sorte, que le sens de l'enroulement en montant sur la première branche soit le même que le sens de l'enroulement en descendant sur la deuxième branche. Une des hélices est dextrorsum, l'autre sinistrorsum, il se produit un pôle austral en A, un pôle boréal en B; on obtient un aimant, à qui l'on peut faire porter des centaines de kilogrammes, si la pile donnant le courant est un peu puissante (*fig.* 179).

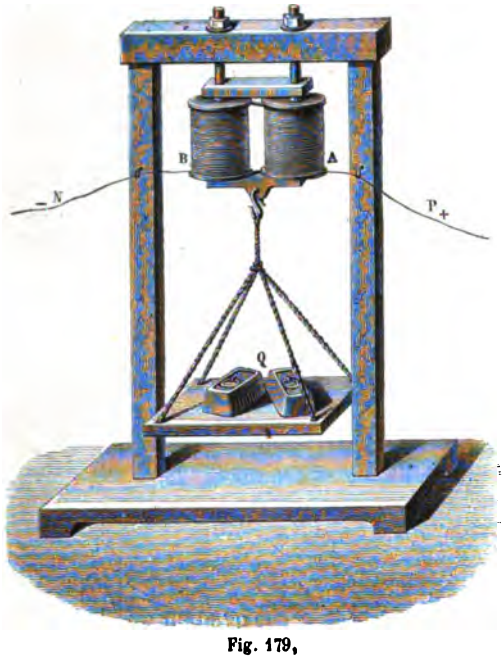


Fig. 179,

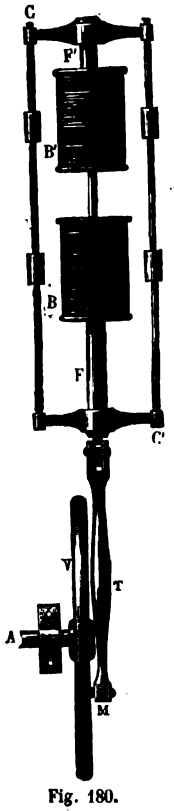


Fig. 180.

Machine à électro-aimants. — En voici le principe : L'électro-aimant B peut attirer le fer doux F, et l'électro-aimant B′ attirer le fer doux F′. Les deux fers F et F′ sont reliés à un même cadre, qui actionne une manivelle. Si on s'arrange, de manière à ce que le courant passe alternativement dans l'une et l'autre bobine, on aura évidemment un mouvement de va-et-vient, que la manivelle transforme.

Le travail dû à l'électricité vient de l'oxydation, c'est-à-dire de la combustion du zinc, le travail de la vapeur vient de l'eau volatilisée; or, pour produire le zinc, il faut employer beaucoup de charbon; il semble donc démontré que la machine électro-motrice ne pourra lutter avec la machine à vapeur, tant qu'on n'aura pas trouvé une source d'électricité simple, peu coûteuse, et en même temps fort énergique.

Télégraphes. — La transmission rapide de la pensée à travers l'espace a été inventée par Chappe, à la fin du siècle dernier; elle se faisait par des signaux, exécutés au moyen de lames articulées mobiles, placées sur des tours élevées.

En 1820, Ampère conçut un appareil télégraphique; et en 1840 M. Wheatstone inventa le premier télégraphe pratique, mu par un électro-aimant.

Principe fondamental : Une pile est placée à Paris, et ses fils se rendent à Bordeaux dans un électro-aimant, dont le fer doux s'aimante et attire le taquet métallique A : quand le courant cesse, le taquet A est ramené en arrière par un ressort à boudin. Chaque interruption et chaque ouverture du courant produisent donc un mouvement de A, et ce mouvement peut se transmettre à tel appareil qu'on voudra, exigeant très-peu de force pour se mouvoir.

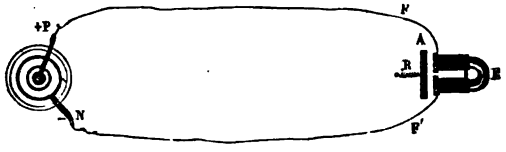


Fig. 181.

Le taquet A doit marcher avec précision et rapidité, il faut donc qu'il soit léger, et en fer doux très-pur pour que l'aimantation cesse instantanément.

La vitesse de l'électricité est assez grande pour qu'on la considère presque comme instantanée pour les distances terrestres. Mais l'intensité du courant varie en raison inverse de la longueur et en raison directe de la section du fil; il faudra donc pour avoir un effet constant, quelle que soit la distance, varier la grosseur du fil avec cette distance.

Il est reconnu que le fil de retour de l'électro-aimant à la pile est inutile : la terre ferme le circuit, et dispense d'avoir un fil de retour. On comprend tout de suite que de ce fait résultent économie et simplicité.

Le fil de ligne est celui qui emporte le courant de la pile, et l'amène à l'électro-aimant : à chaque station, il y a en outre le fil de terre.

Une personne placée à Paris veut communiquer avec Bordeaux, il lui faudra d'abord une pile. (On emploie d'ordinaire celle de Bunsen ou celle de Breguet, et il en faut de 10 à 30 éléments, suivant la distance à parcourir.) Il faut, en outre, pouvoir fermer et ouvrir brusquement le circuit de la pile; l'appareil chargé de cette fonction est le manipulateur. De Paris part le fil de ligne, soutenu par des poteaux, dont il est isolé au moyen de godets en porcelaine, ou enfoui dans le sol, et isolé par de la gutta-percha. Les fils, ou câbles sous-marins, sont formés, par exemple, de quatre fils de cuivre isolés à la gutta-percha, et protégés par dix gros fils de fer galvanisé contournés en hélice. Au point d'arrivée, à Bordeaux, se trouvent l'électro-moteur et l'appareil qui enregistre le mouvement, c'est le récepteur. Au récepteur est annexé un appareil d'avertissement : alarme ou sonnerie.

Pour que l'on puisse répondre de Bordeaux à Paris, il faudra encore une fois les appareils précédents, disposés en ordre inverse, mais on pourra se servir du même fil de ligne, grâce aux permutateurs qui permettent de le faire communiquer, soit avec le manipulateur, soit avec le récepteur d'une station.

L'appareil de Morse est fort régulier, c'est aujourd'hui le plus usuel, et nous en donnerons une explication sommaire (*fig.* 182 *et* 183) :

L'électro-aimant E attire un cylindre A de fer doux, implanté dans un levier LL', mobile autour de l'axe O, et limité dans sa course par les vis V et V', qui arrêtent l'extrémité L. Quand le fer doux est attiré, l'extrémité L du levier s'abaisse, l'extrémité L' se lève, et vient appuyer une bande de papier P contre une roue M, toujours chargée d'encre grasse, fournie par le tambour T. La bande de papier, enroulée en R', est tirée par les deux cylindres CC qui se meuvent en sens contraire sous l'influence d'un mouvement d'horlogerie. Suivant que le

contact du papier sur la roulette M est plus ou moins long, la roulette marque un trait ou un point sur le papier. Or toutes les lettres de l'alphabet sont repré-

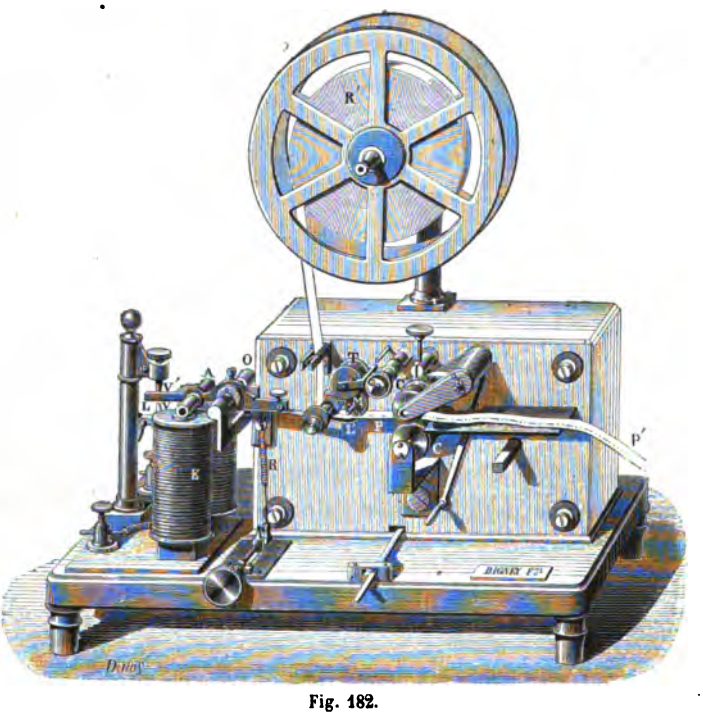


Fig. 182.

sentées par des combinaisons de points et de traits. Exemple : *a* (. —), *b* (— ...), *h* (....), etc... Entre les lettres on laisse un intervalle, et un autre intervalle plus grand entre les mots.

Le manipulateur se compose du levier AB; P est le fil de la pile qui communique avec l'enclume E, L est le fil de ligne qui communique avec le levier AB; le ressort (*r*) soutient le levier, empêche le contact de l'enclume avec la pointe fixée au levier, juste au-dessus de l'enclume. En appuyant avec la main sur le bouton A, on ferme le circuit, et le courant passe dans le fil de ligne. Suivant que le contact de la manette avec l'enclume est plus ou moins prolongé, il se produit au récepteur un trait ou un point. Avec un peu d'habitude, on arrive à produire les lettres avec une précision et une vitesse vraiment extraordinaires. En l'état de repos, le fil de ligne L communique par le levier et par l'enclume E' avec le fil R, qui communique, lui, avec la sonnette d'alarme, destinée à avertir de l'arrivée d'une dépêche.

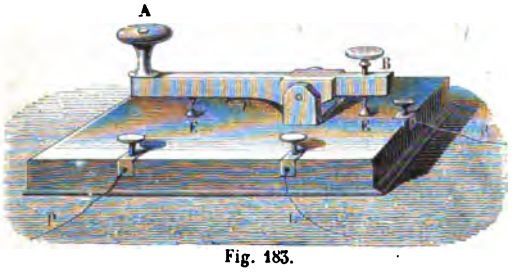


Fig. 183.

Nous dirons, en finissant, que l'abbé Caselli a, dans ces dernières années, construit un appareil, transmettant à distance l'écriture et les dessins.

CHAPITRE V

NOTIONS SUR LA PRODUCTION ET LA PROPAGATION DU SON

Le son est l'effet produit sur l'organe de l'ouïe par les vibrations de la matière, **vibrations qui** se transmettent à l'oreille par l'intermédiaire d'un milieu **gazeux, liquide ou solide.**

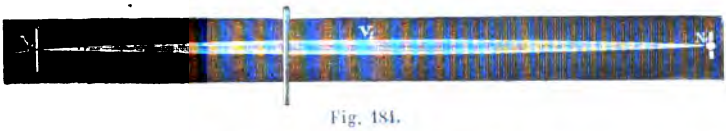


Fig. 184.

Production du son. — Il prend naissance dans l'état vibratoire des corps,

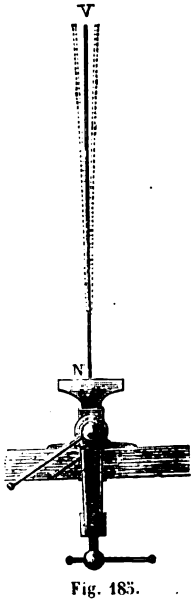


Fig. 185.

Fig. 186.

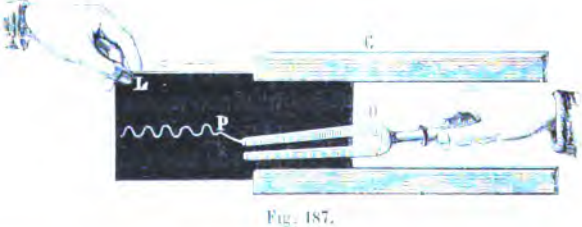


Fig. 187.

ainsi que nous le démontrerons par les expériences suivantes :

1° Une corde fixée à ses deux bouts, et que l'on écarte de sa position en la pinçant au milieu, émet un son; et si la corde se projette sur une surface noire, on la voit parfaitement vibrer; l'œil la perçoit à la fois dans toutes ses positions, elle semble se renfler au milieu : on dit qu'elle présente un ventre au milieu. Tout point de la corde qui reste fixe est un nœud (*fig.* 184);

2° La même sensation se produit avec une verge métallique prise dans un étau N; elle vibre, présente un ventre en V et un nœud en N; en même temps elle donne un son (*fig.* 185);

3° Le diapason, instrument connu de tous, est précisément une application des

Fig. 188.

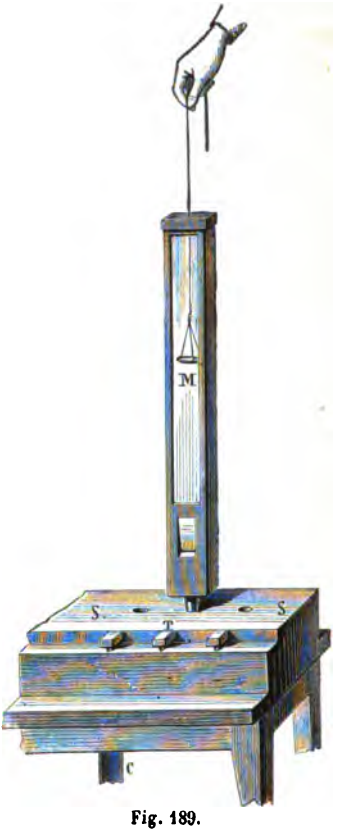


Fig. 189.

verges vibrantes. Pour en tirer un son, on écarte les deux branches A et C, qui se mettent à vibrer. On le monte sur une caisse creuse, qui renforce le son. Les vibrations d'une branche de diapason sont faciles à enregistrer : il suffit de fixer à cette branche, normalement au plan du diapason, une pointe métallique, et de promener en face une plaque recouverte de noir de fumée : la pointe marque sur cette plaque la sinusoïde des vibrations (*fig.* 186 *et* 187);

4° On fait résonner avec un archet un timbre N : il est facile de sentir avec le doigt les vibrations du métal. D'autre part, si l'on dispose près du timbre une aiguille métallique, on entend parfaitement une série de chocs du métal contre l'aiguille : on entend aussi les tressautements d'une bille placée dans le timbre;

5° De l'eau comprimée qui s'échappe d'un petit orifice produit un son;

6° Dans un tuyau d'orgue placé sur une soufflerie, et que l'on fait résonner, on descend un petit plateau rempli de sable fin : on reconnaît que le sable s'agite en certains points (ce sont les ventres), et reste en repos en certains autres (ce sont les nœuds) (*fig.* 189).

Un milieu pondérable est nécessaire à la transmission du son. — Dans

les circonstances ordinaires, les vibrations du corps sonore se communiquent à l'air qui les transmet à la membrane ou tympan de l'oreille. L'air est nécessaire à la transmission; en effet, placez sous la cloche d'une machine pneumatique un timbre T, frappé par un marteau M, que meut un mouvement d'horlogerie : à mesure que la raréfaction augmente, le son s'affaiblit et finit par disparaître, bien que l'on voie toujours le marteau frapper le timbre.

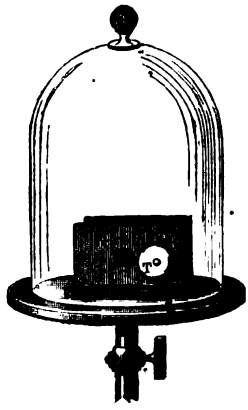


Fig. 190.

A défaut de l'air, tout corps solide ou gazeux transmet aussi le son, et la vitesse est même plus grande dans les solides et dans les liquides que dans les gaz. Souvent on applique l'oreille sur le sol pour entendre une voiture éloignée, un bruit d'artillerie..., etc.; les plongeurs perçoivent parfaitement les bruits du dehors.

Vitesse du son dans l'air. — En 1822, le bureau des longitudes fit des expériences entre Villejuif et Montlhéry. A chaque station, étaient des observateurs, munis de chronomètres : on tirait un coup de canon à Villejuif, par exemple, les observateurs de Montlhéry apercevaient la lumière presque instantanément, car la vitesse de la lumière est énorme : mais ils n'entendaient le bruit que quelque temps après. La distance des deux stations, divisée par ce temps, donnait la vitesse du son. Cette vitesse est d'environ 340 mètres par seconde. Elle est la même pour tous les sons, car une symphonie se transmet à distance aussi pure que l'orchestre la produit.

La vitesse du vent influe pour augmenter ou diminuer d'autant la vitesse du

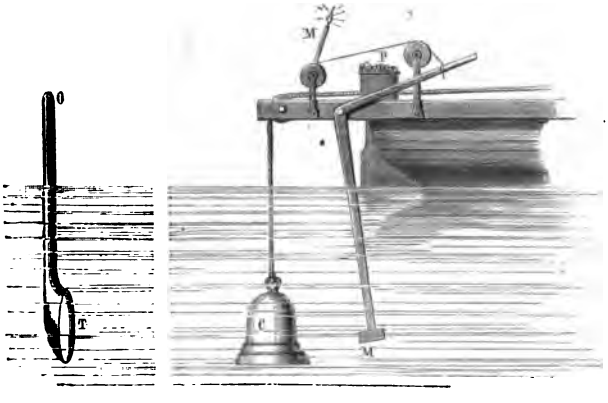


Fig. 191.

son. Les vents de tempête ont des vitesses qui atteignent 40 mètres par seconde. L'influence la plus funeste du vent sur le son est une notable diminution d'intensité : c'est là ce qui rend peu efficace l'emploi des cloches d'alarme dans les phares.

Vitesse du son dans l'eau. — Elle fut déterminée sur le lac de Genève : si on coupe le fil P, le marteau M vient frapper la cloche C; la mèche M, sollicitée par un ressort, vient enflammer la poudre P. L'observateur, placé en 0 à une distance connue, voit la lumière de la poudre, et entend peu après le bruit trans-

mis par l'eau au cornet acoustique T. La vitesse dans l'eau est de 1,435 mètres par seconde.

De la propagation du son. — Imaginons une colonne d'air contenue dans un tube horizontal. L'air de cette colonne est bien homogène, et le son y est produit par une membrane vibrante placée à l'extrémité A : il est évident que nous aurons le même effet sur la colonne d'air, en remplaçant la membrane par un

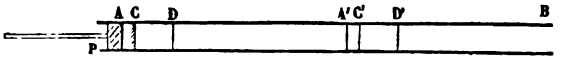


Fig. 192.

piston animé d'un mouvement de va-et-vient de faible amplitude. Le piston avance de A en C, nous savons qu'il ne chasse pas la colonne d'air en bloc, car l'air est compressible, mais qu'il produit seulement une compression ou condensation de la couche d'air contiguë. Mais cette couche comprimée, tend par son élasticité à revenir à son volume primitif; elle transmettra donc sa compression à une couche voisine, celle-ci à la suivante..., etc. Voici donc une couche ou onde condensée qui parcourt le tube avec une vitesse que nous connaissons (340 mètres par seconde). Supposons maintenant que le piston revienne de C en A, la couche contiguë va se dilater, puis revenir à sa position première, en dilatant sa voisine. Voici donc une onde dilatée qui va suivre l'onde condensée, et parcourir le tube avec la même vitesse, c'est-à-dire que les deux ondes vont se suivre à distance égale. L'ensemble des deux ondes s'appelle une ondulation complète ou onde sonore. L'ondulation est d'autant plus courte que la membrane se meut plus rapidement.

Imaginons maintenant un point ou boulet sonore suspendu dans l'espace : l'onde sera sphérique, et se propagera dans l'espace en augmentant de diamètre et étant alternativement condensée et raréfiée. L'intensité du son sur l'ensemble de la surface d'une sphère quelconque est une quantité constante, donc l'intensité en un point de l'espace variera comme la surface de la sphère qui passe en ce point, c'est-à-dire comme le carré de la distance du point à la source sonore.

Dans un son, on distingue trois propriétés principales : l'intensité, la hauteur et le timbre.

Intensité du son. — Elle dépend non pas du nombre de vibrations exécutées par le corps en une seconde, mais de l'amplitude de ces vibrations; elle varie, nous venons de le voir, comme le carré de la distance; elle est modifiée par le vent, et renforcée par le voisinage d'un corps sonore capable d'entrer lui-même en vibration. Ce dernier fait permet de comprendre le rôle des caisses sonores dans les instruments à cordes.

Hauteur du son. — La hauteur ou tonalité est cette propriété qui fait dire qu'un son est grave ou aigu, bas ou élevé.

L'expérience nous apprend que, de deux sons, le plus grave correspond au plus petit nombre de vibrations à la seconde et le plus aigu au plus grand nombre de vibrations à la seconde. La hauteur du son est déterminée par le nombre de vibrations sonores qui se produisent en une seconde. Deux sons se trouvent à l'unisson lorsqu'ils proviennent d'un nombre égal de vibrations.

En général, les sons dont les nombres de vibrations à la seconde sont dans un rapport simple, forment un ensemble harmonieux, ce qu'on appelle un accord : si le rapport est complexe, il y a discordance.

Timbre du son. — C'est la propriété qui distingue deux sons d'égale hauteur

produits par deux instruments différents, par exemple une flûte et un violon. Le timbre semble tenir à la nature même du corps vibrant.

Réflexion du son. — Elle se produit comme la réflexion de la chaleur, et une salle du Conservatoire des arts et métiers offre deux points ou foyers tels, que, si un observateur parle à voix basse en un de ces points, un autre observateur placé à l'autre foyer entend distinctement les paroles du premier. L'écho est dû à une réflexion du son, sur une surface tellement disposée, que le son réfléchi revienne à la source sonore.

Interférences du son. — Il semble que deux bruits devraient toujours se renforcer: il n'en est rien, et deux bruits peuvent en certains points donner du silence. En effet, qu'est-ce qu'un son transmis? C'est une simple vibration de l'air. Que cette vibration en rencontre une autre égale et de sens contraire, leur effet se détruira réciproquement: l'air restera en repos, et par suite on ne percevra aucun son. Si les deux ondes ne sont pas égales, ce qui est le cas ordinaire, il y aura suivant les points et les moments d'observation une série de renforcements et de diminution du son. La découverte des interférences est la meilleure preuve qu'on a pu donner à l'appui de la théorie des ondulations.

CHAPITRE VI

NOTIONS SUR LA PRODUCTION ET LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

Photométrie. — Lois de la réflexion et de la réfraction simple ; miroirs et lentilles. — Dispersion des couleurs; achromatisme. — Bésicles, loupe, microscope. — Lunette de Galilée, lunette astronomique, lunette terrestre. — Principes des appareils lenticulaires des phares.

« L'optique est la partie de la science qui traite des conditions où les corps deviennent aptes à produire en nous les sensations lumineuses, et par conséquent sont visibles.

« Les corps peuvent être lumineux par eux-mêmes, ou seulement visibles par éclairement. Un corps lumineux est visible lorsque les droites menées des points de ce corps à l'œil sont toutes contenues dans un milieu homogène et transparent, ou traversent une série de milieux transparents limités par des faces parallèles; il est totalement ou partiellement invisible, lorsque ces droites rencontrent en totalité ou en partie certains corps appelés opaques. Les conditions d'éclairement d'un corps non lumineux par lui-même sont identiques aux conditions de visibilité d'un corps lumineux. »

L'expression de ces faits expérimentaux est ce qu'on appelle la loi de propagation rectiligne de la lumière : le développement de leurs conséquences constitue la théorie géométrique des ombres.

Soit un point lumineux L et un corps opaque OP, si nous menons les droites

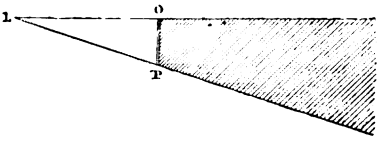


Fig. 194.

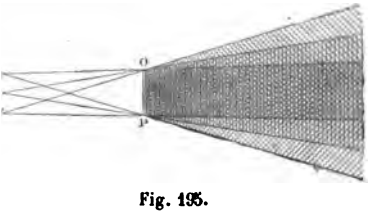


Fig. 195.

LO, LP, elles limitent dans le plan de la figure la partie éclairée ; l'espace AOPB est dans l'ombre.

Soit une ligne lumineuse LL' ; si L était seul, l'ombre serait AOPB ; si L' était seul, l'ombre serait A'OPB'. Dans une partie AOPB' de l'espace les deux ombres se superposeront, on aura l'ombre absolue: les triangles extérieurs BPB', A'OA sont éclairés seulement par un des points lumineux, ces triangles constituent la pénombre. En prenant un point intermédiaire L'', on verra que la pénombre est d'autant moins obscure que l'on approche davantage de sa limite externe.

On passe donc par des dégradations insensibles de l'ombre absolue à l'éclairement absolu.

« L'observation attentive de certains phénomènes astronomiques a montré que l'éclairement d'un corps commence et finit en réalité quelque temps après qu'il est sorti de l'ombre portée par un corps opaque, ou qu'il y est entré. Des procédés fort délicats et néanmoins fort précis ont permis de constater et même de mesurer la durée de cet intervalle dans des expériences de laboratoire. On a reconnu qu'elle est proportionnelle à la distance qui sépare le corps éclairé du corps opaque, et on a appelé *vitesse de la lumière* le quotient constant de cette distance par la durée de l'intervalle dont il s'agit. La valeur la plus probable de cette vitesse, lorsqu'on prend la seconde pour unité de temps est de 300,000 kilomètres environ: c'est dire qu'on peut se dispenser d'y avoir égard dans toutes les expériences qui n'ont pas pour but spécial la mesure des plus petits intervalles de temps.

Ces faits conduisent à regarder la lumière non comme une force qui ferait sentir instantanément son action à toute distance, mais comme un système de molécules matérielles animées d'une vitesse très-grande, mais finie, ou comme une modification de l'état des corps qui se propage graduellement tout à l'entour des corps lumineux ou éclairés. La dernière hypothèse est seule admissible aujourd'hui. Les lignes suivant lesquelles cette modification se propage reçoivent le nom de *rayons de lumière;* les lois précédentes permettent de les regarder comme rectilignes dans un milieu homogène. Ce ne sont pas de pures abstractions géométriques, car, lorsque certaines conditions sont satisfaites, il est permis de leur attribuer des propriétés physiques déterminées.

PHOTOMÉTRIE

L'œil distingue dans ses sensations la *couleur* et l'*intensité;* bien qu'il reconnaisse des différences d'intensité entre des couleurs diverses, il ne juge un peu exactement de l'intensité qu'autant que la couleur est la même. Dans cette condition même, il n'apprécie bien que l'égalité d'intensité et ne donne aucune notion d'un rapport numérique entre des intensités différentes.

Si deux sources de lumière de mêmes dimensions éclairent deux surfaces de même nature placées dans les mêmes conditions de distance et d'inclinaison par rapport aux sources et à l'œil, lorsque les impressions éprouvées par l'œil sont égales, on doit considérer les deux sources comme identiques. Si deux, trois, quatre sources de lumière identiques éclairent simultanément une surface donnée dans les mêmes conditions, on est convenu de dire que l'éclairement est doublé, triplé, quadruplé, etc., ou que la surface reçoit une quantité double, triple, quadruple, etc., de lumière, il n'est d'ailleurs pas certain que ces nombres expriment l'accroissement d'énergie de la sensation proprement dite.

Un corps lumineux de forme quelconque, dont tous les éléments superficiels sont placés dans les mêmes conditions physiques, ne peut se distinguer d'un plan lumineux lorsque sa distance à l'œil est assez grande pour que les droites qui joignent ses divers points à l'ouverture de la pupille soient presque parallèles (exemple de la lune et du soleil). Par conséquent les éléments que découpent sur la surface du corps divers cylindres presque parallèles ayant pour base l'ouverture de la pupille, envoient à l'œil des quantités égales de lumière. Comme les étendues de ces éléments sont inversement proportionnels au cosinus

de l'angle formé par la normale à l'élément avec les arêtes du cylindre, il en résulte que la quantité *de lumière envoyée par un élément lumineux donné dans diverses directions est proportionnelle au cosinus de l'inclinaison.* —Il est d'ailleurs évident que la quantité de lumière envoyée par un élément lumineux à une surface très-éloignée (relativement à ses dimensions) est proportionnelle au cosinus de l'angle formé par la normale à la surface avec la direction des rayons lumineux.

Loi du carré des distances. — L'intensité de la lumière varie comme le carré des distances. Preuve expérimentale : l'éclairement produit par une source (agissant sous une inclinaison donnée) est égal à l'éclairement produit par quatre sources identiques (agissant sous la même inclinaison) placées à une distance double.

Expression de la quantité de lumière envoyée par une surface à une autre, lorsque la distance est très-grande par rapport aux dimensions des deux surfaces :

$$I = \frac{S.E.S'}{D^2}$$

S = projection de la surface lumineuse sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons ;

S' = projection de la surface éclairée sur le même plan ;

D = distance ;

E = coefficient dépendant de la source de lumière, ou *éclat intrinsèque ;*

Photomètre de Rumford. — Entre les deux sources que l'on compare et un écran translucide, on place un cylindre opaque, et on fait varier la distance des sources jusqu'à ce que les deux ombres portées paraissent de même valeur.

Lorsque cette égalité a lieu, il est évident que l'ombre relative à la source A reçoit de la source B autant de lumière que l'ombre relative à la source B en reçoit de la source A. On peut donc, en apeplant D_1 et D, les distances A M et BN poser encore l'équation :

$$\frac{SE}{D^2} = \frac{E_1 S_1}{D_1^2}.$$

Mais la méthode est extrêmement défectueuse en raison de l'éloignement des deux surfaces que l'on compare entre elles. »

Réflexion. — Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une surface polie, il se réfléchit en totalité ou en partie, c'est-à-dire qu'il est renvoyé vers le milieu d'où il émane.

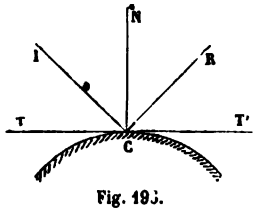


Fig. 193.

Nous avons déjà vu pour la chaleur incidente ce qu'était le rayon incident I et le rayon réfléchi R, l'angle d'incidence ICN et l'angle de réflexion RCN.

Ceci posé, voici les lois de la réflexion d'un rayon lumineux :

1° Le rayon réfléchi est dans le plan de la normale et du rayon incident ;

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Le long d'un cercle gradué vertical se meuvent deux tuyaux ou alidades, dont l'axe passe toujours par le centre du cercle. Ces tuyaux sont en partie fermés et ne possèdent qu'un petit trou placé dans leur axe. Au diamètre horizontal du cercle est adapté un miroir plan, lui-même horizontal. On reçoit un rayon lumineux par l'axe du tube II', et l'on reconnaît que l'on peut trouver son rayon réfléchi avec l'autre tuyau : donc les deux rayons sont dans un même plan parallèle au plan

vertical du cercle, c'est-à-dire normal au miroir. On reconnaît de plus sur les cercles gradués que les angles des rayons avec la verticale N normale au miroir sont égaux. Les deux lois énoncées plus haut sont donc démontrées.

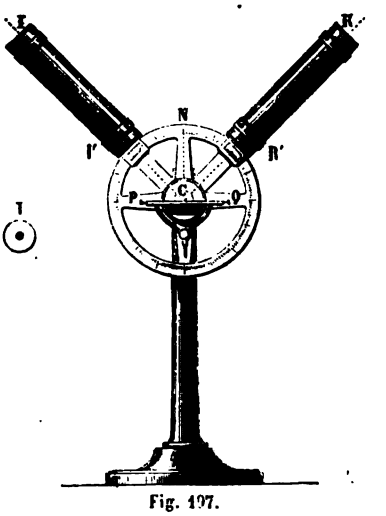


Fig. 197.

Miroirs plans. — 1° L'image d'un point A est le point A' symétrique de A par rapport au plan du miroir. En effet l'image du point se trouve à la rencontre des rayons réfléchis CR, C'R' que l'œil reçoit: or les droites CR sont les prolongements des côtés CA', C'A' des deux triangles isocèles CAA', C'AA': car l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence; donc NCR = NCA = CAA' = CA'A ; or CN et AA', sont parallèles, donc CR est dans le prolongement de CA'.

2° L'image d'un objet est l'ensemble des images des points de cet objet; l'image de l'objet AB est donc la figure A'B' symétrique de AB par rapport au plan du miroir.

Il est facile de voir que l'image A' d'un point A n'est visible que pour l'observateur situé dans l'espace R'PQR que limitent les rayons réfléchis extrêmes (*fig.* 200).

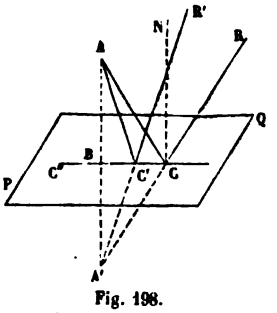


Fig. 198.

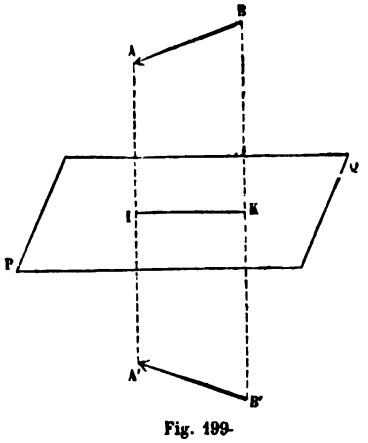


Fig. 199.

3° Si l'on considère un miroir formé de deux miroirs plans placés à angle droit, un objet placé dans leur angle donnera une image dans chacun: mais les rayons réfléchis sur un miroir, le miroir vertical par exemple, sont comme de nouveaux rayons lumineux qui émaneraient de l'image A' dans le plan vertical: il en résultera une troisième image A''' symétrique de A' par rapport au plan horizontal. De même les rayons réfléchis sur le plan horizontal, semblant émaner de l'image A'', viendront rencontrer le plan

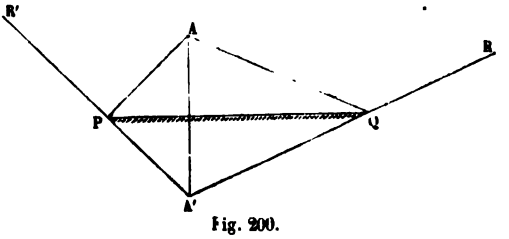


Fig. 200.

vertical ; ils donnent une image A^{IV} symétrique de A'' par rapport au plan vertical. Il est facile de voir par le dessin que A''' et A^{IV} coïncident. Donc, en résumé, on a trois images de l'objet A. Les propriétés des miroirs inclinés sont utilisés dans le jouet appelé kaléidoscope.

4° Deux miroirs parallèles donnent une infinité d'images de A, car chaque

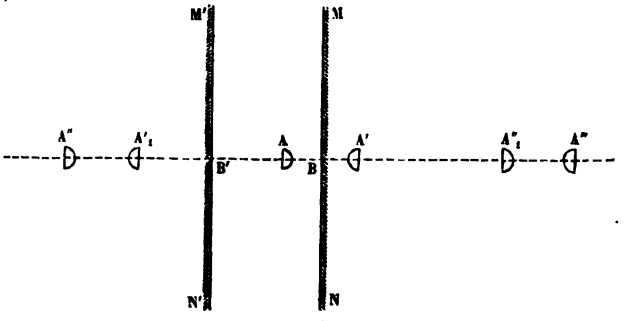


Fig. 201.

image formée dans un miroir donne naissance à une nouvelle image dans l'autre miroir.

Miroirs sphériques. — 1° *Miroirs concaves.* — Imaginons un arc de cercle MN et le diamètre CO qui passe au milieu de cet arc; CO est l'axe principal, et le miroir est engendré par la rotation de l'arc MN autour de l'axe CO. La surface réfléchissante est la surface concave. Un faisceau lumineux cylindrique, parallèle à l'axe principal, se réfléchit très-sensiblement suivant un cône dont le sommet est en F au milieu du rayon de courbure OC du miroir. Cette proposition s'approche

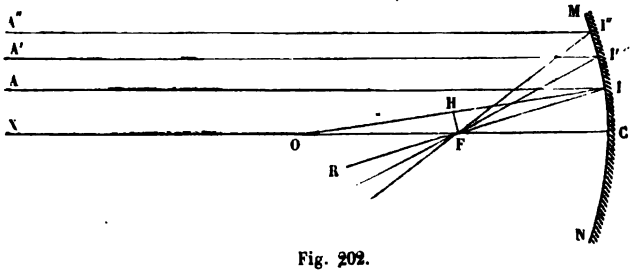


Fig. 202.

d'autant plus de la vérité que le rayon de courbure CO est plus grand et l'ouverture MN du miroir plus étroite. Prenons un rayon incident AI, il se réfléchit suivant le rayon IR faisant avec la normale IO l'angle OIF = OIA ; mais l'angle OIA = l'angle IOC ; donc IOC = OIF, c'est-à-dire IF = OF. En supposant l'ouverture petite et le rayon très-grand, la longueur FI diffère très-peu de FC ; donc, on peut admettre que OF = FC. Ainsi, tous les rayons incidents concourent sensiblement, après leur réflexion, au point F, milieu de OC, qu'on appelle foyer du miroir.

En réalité, le foyer ne se réduit pas à un point F ; il comprend la courbe, enveloppe de tous les rayons lumineux, et occupe un certain espace, comme le montre la figure 203. Cette existence de plusieurs foyers, au lieu d'un seul, est ce qu'on appelle l'aberration de sphéricité du miroir ; elle a pour effet de donner des

images très-peu nettes, lorsque le rayon du miroir est trop petit ou l'ouverture

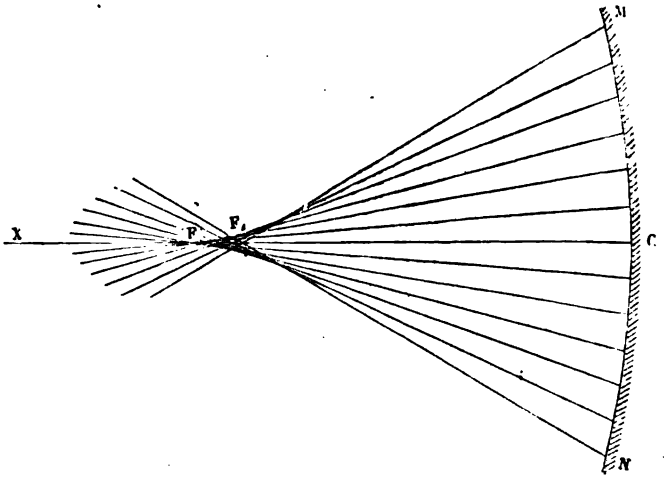


Fig. 203.

trop grande. En plaçant en F un petit écran, on voit sur cet écran l'image du point A situé à l'infini sur l'axe principal du miroir.

Foyers conjugués. — Un point lumineux P, situé sur l'axe principal du miroir a une image qui se confond sensiblement avec le point P′ (toujours en admettan

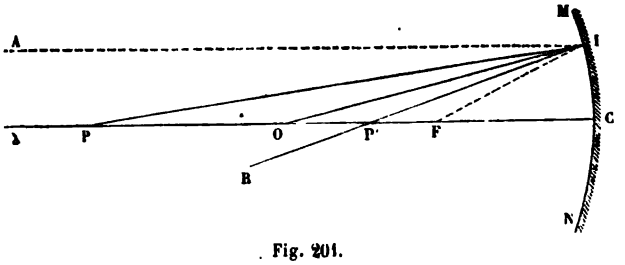


Fig. 201.

pour le miroir petite ouverture et grand rayon). La ligne IO est la bissectrice de l'angle PIP′; donc elle partage la base en deux parties proportionnelles aux côtés, et l'on a : $\frac{OP}{OP'} = \frac{PI}{P'I}$. Appelons p et p' la distance du point lumineux et de son image au centre du miroir, et soit $2f$ le rayon du miroir. PI et P′I sont sensiblement égales à PC et P′C, c'est-à-dire à p et p' ; le rapport précédent devient donc $\frac{p-2f}{2f-p'} = \frac{p}{p'}$, ou bien $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, équation qui donne p', connaissant p et f. On voit que si la source P part de l'infini pour venir en O, son foyer part de F, milieu de OC ($p' = f$) pour arriver en O ($p' = 2f$) ; quand la source est au centre de courbure, elle est à elle-même son foyer. Enfin, quand la source varie de O en F, son foyer s'éloigne de O jusqu'à l'infini. Si la source s'avance de F au centre du miroir, le foyer n'existe plus, les rayons réfléchis divergent ; on dit alors qu'il y a un foyer virtuel, c'est le point de concours du prolongement des rayons réfléchis

derrière le miroir. On obtient sa distance p' au centre en changeant dans la formule p' en $-p'$; elle devient alors $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$.

Axes secondaires. — Toute ligne qui passe par le centre de courbure présente

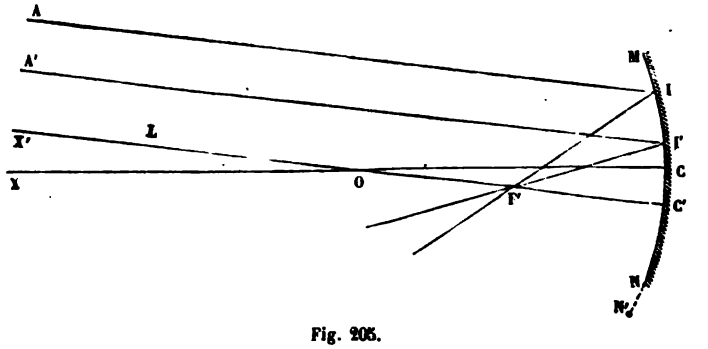


Fig. 205.

les mêmes propriétés que l'axe principal, relativement aux sources lumineuses qui la parcourent. Une telle ligne est un axe secondaire (*fig.* 205).

Image d'un objet. — Étant donné un objet AB, le point A, par exemple, a son foyer conjugué sur la droite AOC', et tous les rayons émanés de A vont sensiblement concourir en ce foyer après leur réflexion ; parmi ces rayons, il y en a un AI qui est parallèle à l'axe principal et qui a pour rayon réfléchi la droite IF partageant le rayon OC en deux parties égales ; il est donc facile de construire le rayon réfléchi IF et par suite le point A', foyer du point A. On construira de même B', foyer conjugué de B, et A'B' sera l'image de AB, image que l'on peut recevoir sur un petit écran et qui sera très-nette si l'ouverture du miroir est très-petite et son rayon très-grand. Elle sera quelquefois un peu confuse, toujours à cause de l'aberration de sphéricité.

Quand l'objet donné AB se trouve entre F et le centre C du miroir, les rayons réfléchis divergent ; l'image est derrière le miroir, c'est une image virtuelle, on

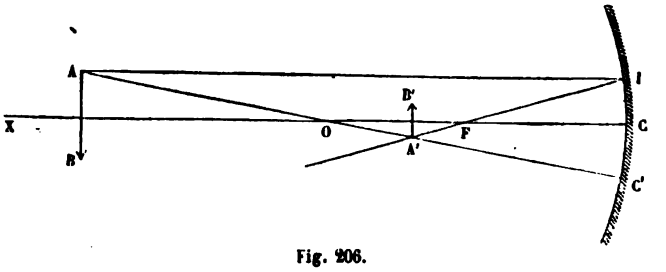


Fig. 206.

la voit, mais on ne peut la recueillir sur un écran. Il est facile de voir que, suivant la position de l'objet, l'image peut être une réduction ou un agrandissement de cet objet.

2° *Miroirs convexes.* — Les rayons parallèles tels que AI concourent en un foyer virtuel F situé au milieu de OC.

Un objet AB a une image virtuelle A'B' que l'on construit d'une manière analogue à celle que nous avons employée pour les miroirs concaves. La formule des

foyers conjugués est ici : $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$; on l'établit comme celle de plus haut

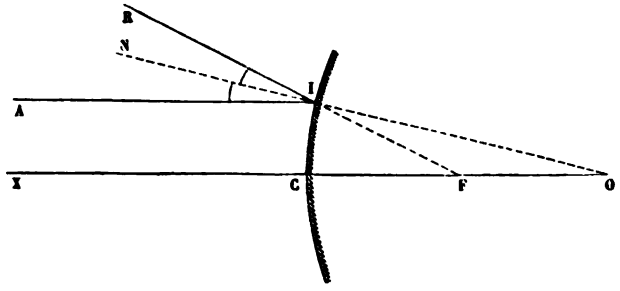


Fig. 207.

Réfraction. — Les rayons lumineux qui rencontrent obliquement un corps transparent y pénètrent en changeant de direction ; la direction nouvelle est généralement la même pour tous les rayons d'un même faisceau ; quelquefois ce-

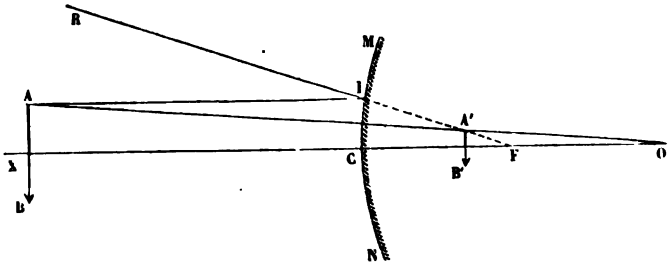


Fig. 208.

pendant, certaines substances décomposent le faisceau lumineux en deux parties ; ce fait constitue le phénomène de la double réfraction. Nous ne nous occuperons que de la réfraction simple. Un milieu où pénètre un rayon est plus réfringent que le milieu d'où il sort, si le rayon se rapproche de la normale à la surface de séparation.

Lois de la réfraction. — 1° Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface de séparation, sont dans un même plan ; 2° le sinus de l'angle d'incidence est au sinus de l'angle de réfraction dans un rapport constant pour deux milieux donnés ; ce rapport change avec les milieux (*fig.* 209).

Cette dernière loi se traduit géométriquement par la relation

$$\frac{IP}{QR} = \frac{I'P'}{Q'R'} = \text{constante } n.$$

Vérification. — Dans une chambre noire, on reçoit sur le miroir mobile M un rayon de soleil entrant par le trou d'un volet. On incline le miroir de façon à diriger le rayon réfléchi dans l'axe d'un tube ; soit IC ce rayon, il rencontre normalement un cylindre en verre à génératrices horizontales, à moitié rempli d'eau : la réfraction se produit à la surface horizontale AB de l'eau, mais il n'y a pas de réfraction à la surface du verre, car les rayons IC et CR sont normaux à cette sur-

face. Il est facile de suivre dans l'obscurité le rayon lumineux et de constater qu'en passant dans l'eau il se rapproche de la verticale, c'est-à-dire de la normale à la surface de séparation. Il est facile de vérifier aussi la loi des sinus en

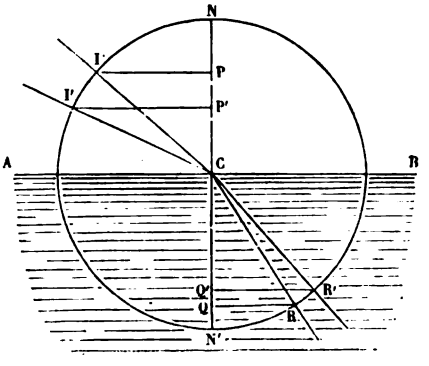


Fig. 209.

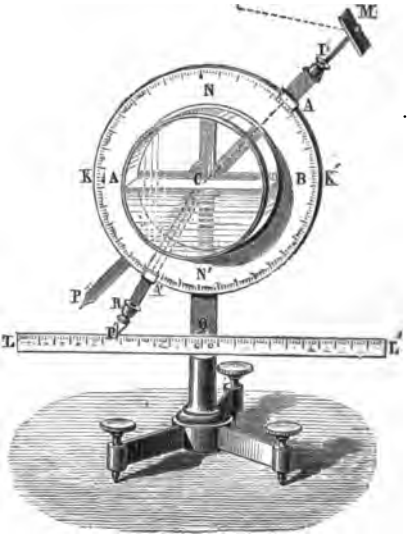


Fig. 210.

faisant varier l'angle d'incidence et lisant les angles d'incidence et de réfraction. On peut encore se servir d'une règle horizontale LL' mobile le long de la colonne de l'appareil ; on lit directement les sinus sur cette règle, que l'on met successivement en contact avec les extrémités pointues P et P' des deux alidades.

La loi s'exprime algébriquement par $\frac{\sin i}{\sin r} = n$; n est l'indice de réfraction pour le passage de l'air dans l'eau ; l'indice de réfraction pour le passage de l'eau dans l'air serait $\frac{1}{n}$. Le rayon s'éloigne de la normale en passant de l'eau dans l'air. On a $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, et l'on voit que $r = 90°$ ou $\sin r = 1$, pour $\sin i = \frac{1}{n}$; lorsque $\sin i$ prend la valeur limite $\frac{1}{n}$, on voit que le rayon qui passe de l'eau dans l'air ait un angle de 90° avec la normale NN', c'est-à-dire qu'il est situé dans le plan horizontal HH'. Lorsque ($\sin i$) est plus grand que $\frac{1}{n}$, il n'y a plus réfraction, le rayon lumineux retourne dans l'eau et prend la direction C_1K ; il y a alors réflexion totale du rayon lumineux. Ainsi, lorsqu'un rayon situé dans un milieu vient frapper la surface de séparation de ce milieu et d'un autre milieu moins

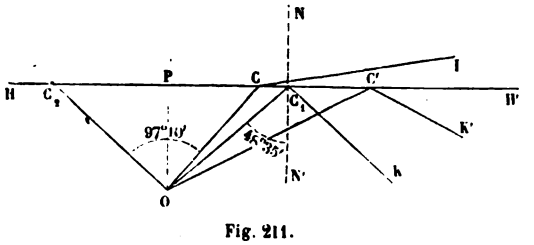


Fig. 211.

réfringent, il n'y a pas toujours réfraction ; il y a réflexion totale lorsque l'angle d'incidence dépasse une certaine limite.

Effets de réfraction. — 1° Dans un vase, placez une pièce de monnaie P, et mettez l'œil en O, de façon à ne voir que la limite extrême de cette pièce ; versez maintenant de l'eau dans le vase, et vous apercevrez la pièce tout entière, parce qu'un rayon tel que PC se réfracte à son arrivée dans l'air, s'éloigne de la verticale et peut parvenir jusqu'à votre œil. Quand vous plongez un bâton dans l'eau, il semble rompu à la surface de séparation : c'est un effet de réfraction ; vous voyez le bâton, non pas à la place qu'il occupe réellement dans l'eau, mais à l'endroit où concourent les rayons réfractés. La partie immergée semble donc relevée, comme la pièce de tout à l'heure.

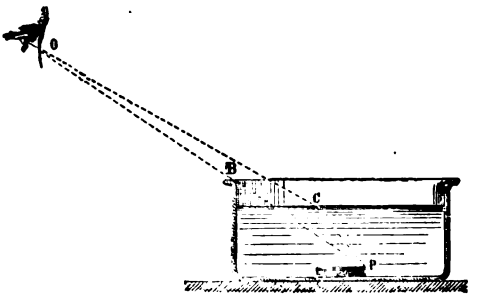


Fig. 212.

2° *Mirage*. La réfrangibilité des milieux diminue avec leur densité. Dans les pays chauds, le sol est à une température élevée ; les couches voisines du sol s'échauffent plus que les couches supérieures, et sont moins réfrangibles que celles-ci. D'après cela, le rayon AB s'écarte de la verticale et prend la direction

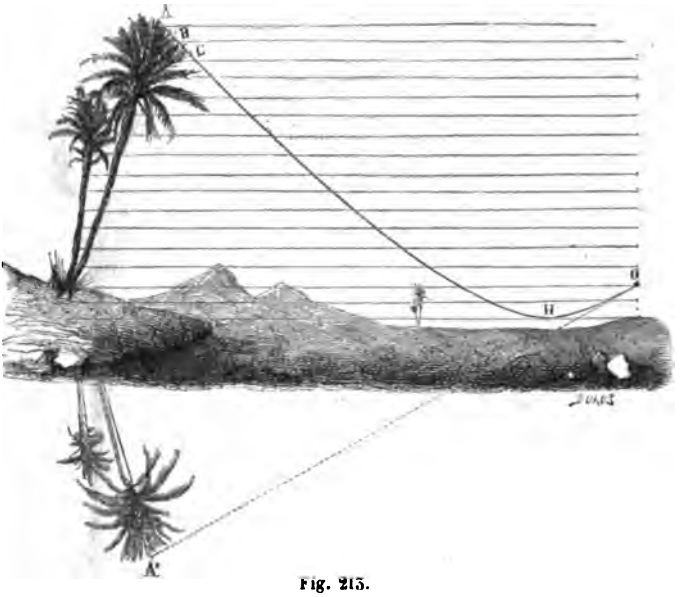


Fig. 213.

BC ; il s'écarte ainsi de la verticale jusqu'à une certaine couche où il éprouve en H une réflexion totale et se dirige vers le point O, par exemple. L'observateur placé en O verra le point A en A'. C'est ainsi qu'en Égypte, nos soldats croyaient approcher de bois de palmiers imaginaires. Le bleu du ciel se réfracte aussi, et fait l'effet sur le sol de lacs immenses qui reculent sans cesse devant le voyageur altéré.

Applications de la réfraction. — 1° *Lame à faces parallèles.* — Le rayon incident EF se rapproche de la normale et devient FG, qui, passant de la lame

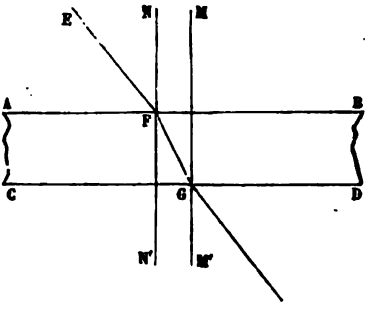


Fig. 214.

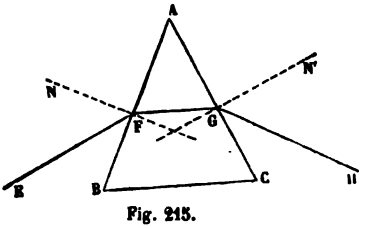


Fig. 215.

dans l'air, s'écarte de la normale de la quantité dont il s'en était rapproché. Le rayon GH est donc parallèle à EF. Le rayon lumineux qui traverse une lame à faces parallèles reste parallèle à lui-même.

2° *Prismes.* Soit un prisme de verre ou de cristal dont ABC est la section : le rayon incident EF rencontrant la surface AB s'infléchit vers le bas en se rapprochant de la normale N, il devient FG; celui-ci rencontrant la surface AC, s'infléchit encore vers le bas; en s'éloignant de la normale N', il devient GH. Si EF est

Fig. 218. Fig. 219. Fig. 220.

Fig. 221. Fig. 222. Fig. 223.

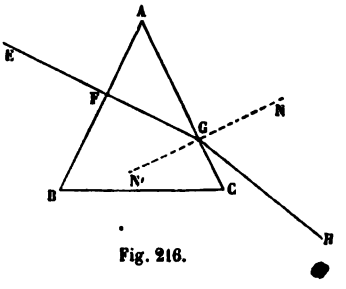


Fig. 216.

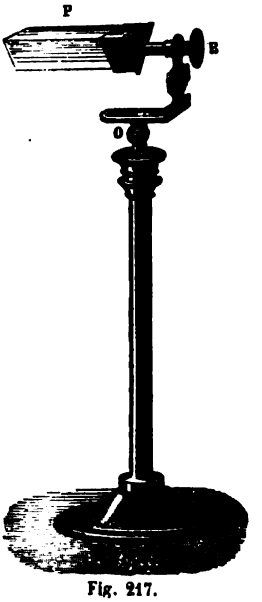


Fig. 217.

normale à AB, il n'y a qu'une déviation, et le rayon émergent est GH. Si le rayon lumineux FG rencontre la face AC sous un angle supérieur à l'angle limite, il y a réflexion totale sur cette face AC, et le rayon lumineux émerge par la base BC.

Dans tous les cas, le prisme tend à rejeter vers sa base les rayons qu'il reçoit. Dans la pratique, un prisme est monté comme on le voit sur la figure 217.

3° *Lentilles.* — Ce sont des morceaux de substances transparentes limités par des surfaces sphériques.

On les distingue : 1° en lentilles convergentes qui sont à faces convexes, ou qui n'ont qu'une surface concave d'un rayon supérieur à celui de la surface convexe, et 2° en lentilles divergentes qui sont à surfaces concaves ou qui n'ont qu'une surface convexe d'un rayon supérieur à celui de la surface concave.

Lentille convergente. — Soit C et C′ les centres des deux ménisques ou calottes sphériques qui limitent la lentille ; XX est l'axe principal de la lentille. Un point lumineux P envoie le rayon PI, la normale en I est IC et la loi des sinus

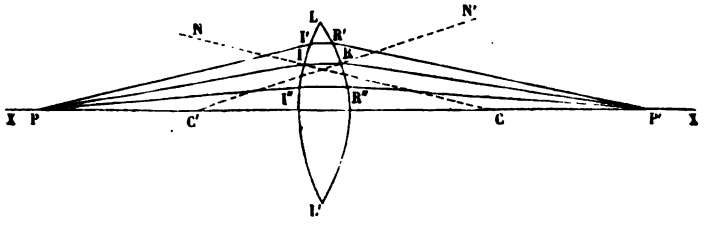


Fig. 224.

permet de construire le rayon réfracté IR ; la normale en R est RC ; le nouveau rayon réfracté peut encore se construire, grâce à la loi des sinus, soit RP′ ce rayon.

Sur une lentille placée dans une chambre obscure, recevez un faisceau de rayons lumineux parallèles à l'axe principal ; ces rayons émergent de la lentille et vont

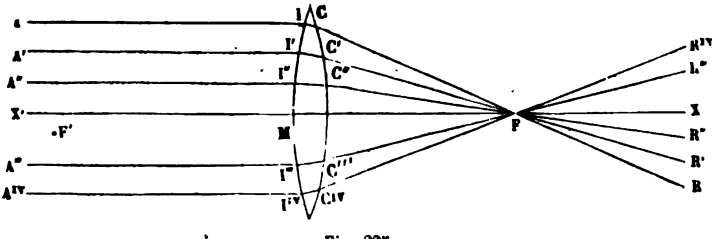


Fig. 225.

concourir en un point F appelé foyer principal de la lentille. Retournez la lentille, vous obtiendrez un second foyer principal F′, à la même distance de la lentille que le foyer F.

Si en un point de l'axe principal d'une lentille (voir. la figure 224) vous placez une source lumineuse très-petite P, vous pourrez avec un écran recueillir en P′ l'image de P. P′ est le foyer conjugué de P.

Un rayon lumineux dirigé suivant l'axe principal d'une lentille, ne subit pas de déviation (*fig.* 226). On appelle axe secondaire toute droite MM′ qui joint deux points pour lesquels les tangentes aux deux ménisques sont parallèles. Tout rayon qui entre en M et sort en M′, est dans la même condition que s'il traversait une lame à faces parallèles ; il reste parallèle à lui-même. Si la lentille est peu épaisse, ce qui arrive toujours, on peut admettre que IM′ et MR sont dans le prolongement l'une de l'autre et peuvent se remplacer par la ligne droite très-voisine X_1X_1' qui

devient alors l'axe secondaire ; le point O où MM′ rencontre l'axe principal CC′, est le centre optique de la lentille. On démontre que toute droite MM′ qui y passe rencontre les ménisques en deux points où les tangentes sont parallèles. Tout rayon X_1X_1' qui passe au point O n'est point sensiblement dévié par son passage à travers la lentille, pourvu que l'épaisseur de cette lentille soit petite relativement à la hauteur LL′.

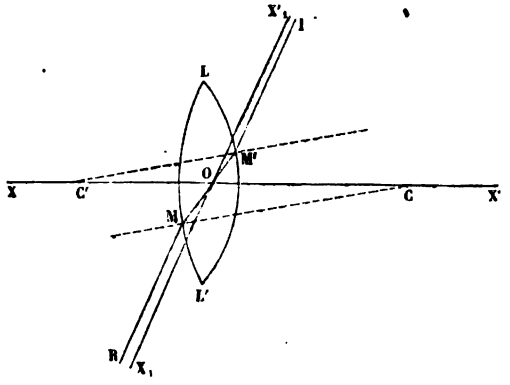


Fig. 226.

L'expérience nous apprend que les foyers conjugués P_1P' se produisent pour les axes secondaires comme pour les axes principaux (*fig.* 227).

Image d'un objet (*fig.* 228). — Pour le point A, il est deux rayons faciles à construire : 1° le rayon AO passant par le centre optique ; ce rayon n'est pas dévié ; 2° le

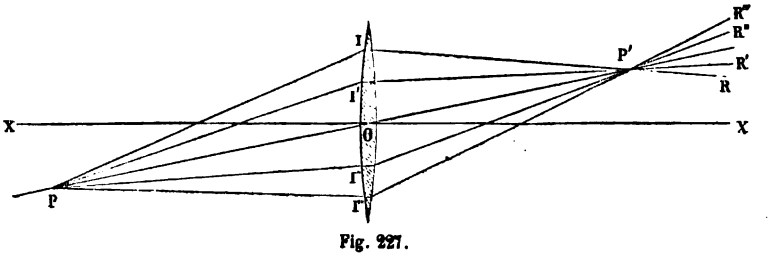


Fig. 227.

rayon AI, parallèle à l'axe principal et qui, après réfraction, passe en F au foyer principal. L'intersection des deux rayons donne A′, foyer conjugué ou image de A. On

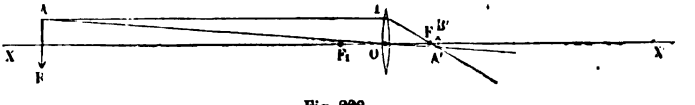


Fig. 228.

obtiendra de même l'image B′ de B, et A′B′ sera l'image de AB ; l'image est renversée, et agrandie ou diminuée suivant la position de l'objet par rapport au

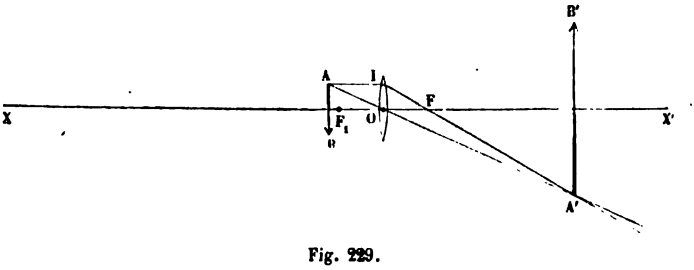


Fig. 229.

foyer principal. Si l'objet est très-éloigné comme dans la figure 228, l'image

est très-petite et voisine du foyer principal F. L'image s'agrandit à mesure que l'objet s'approche du foyer F_1 et en même temps elle s'éloigne de F pour s'en aller à l'infini lorsque AB arrive en F_1 (*fig.* 229).

Enfin, lorsque l'objet AB est compris entre le foyer principal F_1 et la lentille, l'image est virtuelle, se produit en A'B', et l'observateur placé à droite de la lentille l'aperçoit au travers de cette lentille (*fig.* 230).

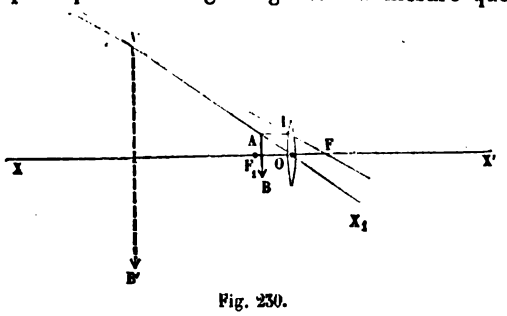


Fig. 230.

Si l'on pose $OA = p$, $OA' = p'$, $OF = f$, la formule des foyers conjugués est $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ pour les images réelles, et $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ pour les images virtuelles.

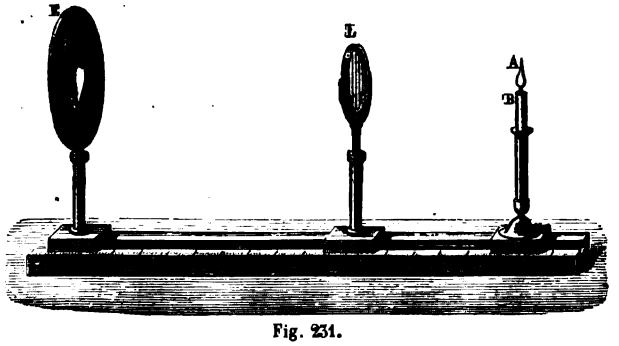


Fig. 231.

La vérification expérimentale de la formule peut se faire avec l'appareil représenté figure 231, appareil dont le mécanisme se comprend de lui-même.

Il ne faut pas oublier que, dans toutes ces considérations théoriques, nous supposons l'épaisseur des lentilles très-petite; il n'en est pas toujours ainsi dans la pratique, et les lois précédentes ne sont que l'expression approchée de la vérité.

Lentilles divergentes. — Le caractère des lentilles divergentes est d'augmenter la divergence des rayons qui divergent déjà, et de diminuer la convergence de ceux qui concourent en un point. Il est facile de reconnaître sur la figure 232 cette propriété des lentilles biconcaves.

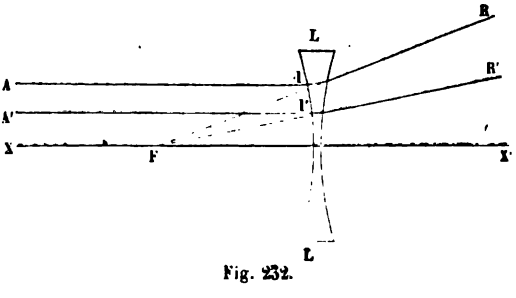


Fig. 232.

Dispersion des couleurs. — Spectre solaire. — Dans le volet d'une chambre obscure, on perce un petit trou par lequel on reçoit un faisceau de lumière solaire; ce faisceau traverse un prisme et se dilate comme le montre la figure 233, il semble que la lumière solaire soit formée de plusieurs lumières inégalement réfrangibles.

L'image oblongue, recueillie sur un écran, présente sept teintes principales qui sont, en commençant par l'extrémité la plus éloignée du faisceau lumineux initial :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

De cette expérience, Newton tira les trois principes suivants :

1° La lumière blanche est composée d'une infinité de rayons colorés se rapportant à sept teintes principales, appelées couleurs élémentaires ;

Fig. 233.

2° Les rayons diversement colorés sont inégalement réfrangibles : le violet est le plus réfrangible, le rouge offre le minimum de réfrangibilité ;

3° Les couleurs élémentaires sont simples, c'est-à-dire indécomposables : en effet, si on fait tomber successivement chacune d'elle sur un prisme, il n'y a pas de décomposition.

Il faut donc concevoir un rayon lumineux solaire comme composé d'une infinité de rayons colorés dont la teinte varie d'une manière continue du violet au rouge, et dont la réfrangibilité diminue du violet au rouge. Nous donnons ici une image du spectre solaire (*fig.* 234).

Newton présenta à l'appui des principes précédents plusieurs expériences :

1° Regardez à travers un prisme mince une bande moitié rouge, moitié violette collée sur un fond noir ; l'image que vous en apercevez sera scindée en deux parties et la partie violette aura subi la plus grande déviation (*fig.* 235).

2° Expérience des prismes croisés : Recevez un faisceau lumineux sur un prisme à arête horizontale, vous obtiendrez un spectre solaire oblong dans le sens vertical ; recevez ce spectre sur un prisme à arêtes verticales, vous produirez sur un écran une image du spectre qui ne sera plus verticale, mais inclinée, et la teinte violette s'écartera plus que toutes les autres de la verticale initiale.

Pour porter dans les esprits une conviction plus profonde, Newton opéra la recomposition de la lumière blanche par les expériences suivantes :

1° Sur le trajet du faisceau décomposé, il plaça un prisme placé en sens inverse du prisme décomposant : les diverses couleurs simples recevaient une déviation égale et de sens contraire à celle qu'ils avaient reçue du premier prisme, de sorte qu'à la sortie du second prisme on retrouvait un faisceau de lumière blanche.

2° Une lentille convergente placée perpendiculairement à la route suivie par les rayons du spectre les recompose et donne à son foyer une image blanche que l'on peut recevoir sur un écran.

3° Mélangez plusieurs poudres colorées des couleurs du spectre : l'impression résultant du mélange est une teinte grise, s'approchant du blanc.

4° Sur un cercle en carton, mobile autour de son axe, collez des secteurs en papier colorés des teintes du spectre, et donnez à l'appareil un vif mouvement de rotation. L'œil perçoit à la fois toutes les teintes, et l'impression résultante est une teinte grise.

La coloration des objets tient à ce qu'ils réfléchissent une des couleurs simples de la lumière blanche et absorbent toutes les autres. Les feuilles sont vertes parce qu'elles absorbent toutes les couleurs du spectre sauf les rayons verts qu'elles réfléchissent.

Achromatisme. — Nous avons constaté pour les lentilles comme pour les miroirs un défaut de netteté dans l'image, défaut qui tient à la forme sphérique des lentilles et que nous avons appelé aberration de sphéricité.

Mais cette aberration est faible à côté de ce que nous appellerons l'aberration de réfrangibilité. En réalité, un rayon lumineux qui traverse une lentille est dans le même cas que s'il traversait un prisme, et ce rayon est décomposé en ses couleurs simples, qui sont inégalement réfrangibles. Il en résulte une grande confusion de l'image ; les bords, au lieu d'être limités par une ligne bien accusée, sont formés de plusieurs bandes présentant les couleurs du spectre.

Les lentilles spéciales donnant des images incolores sont dites achromatiques (de α privatif et $\chi\rho\tilde{\omega}\mu\alpha$, couleur, sans couleur).

Prismes achromatiques (*fig.* 236). — Prenons deux prismes inverses : le rayon incident ID sort du premier décomposé ; les rayons rouges sont en RR', les rayons violets en VV'. Ces divers rayons tombant sur un second prisme sont relevés et deviennent R''R''', V''V''' dont la direction se rapproche de celle du rayon incident. Si les deux prismes sont identiques, les rayons émergeant du second seront parallèles au rayon incident ID; la lumière sera recomposée, on aura un système achromatique. Mais ce système ne servira à rien en pratique, puisque les rayons lumineux le traversent sans déviation.

Fig. 234.

Voici ce qu'imagina Dollond : il fit le second prisme d'une substance autre que celle du premier, et, grâce à la connaissance des indices de réfraction, il arriva

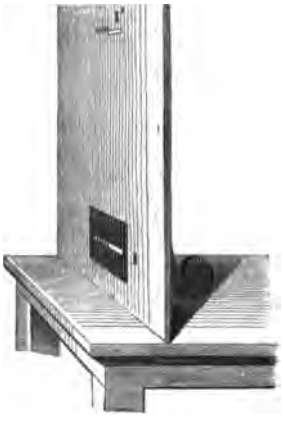


Fig. 255.

à calculer pour les angles au sommet de ses prismes des valeurs telles, que les rayons simples redevenaient parallèles à la sortie du second prisme, en ayant cependant complétement changé de direction.

Lentilles achromatiques. — Le calcul seul permet de se rendre un compte exact de leur composition. Nous ferons seulement remarquer que si on mène les plans tangents à une lentille aux points de pénétration et de sortie d'un rayon

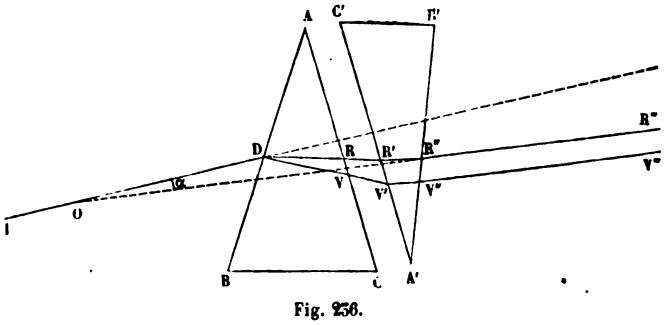


Fig. 256.

lumineux, ce rayon sera dévié comme s'il traversait un prisme dont l'arête serait à l'intersection de ces deux plans tangents. La dispersion subie par la lumière qui traverse une lentille semble, d'après cela, devoir être combattue en plaçant derrière cette lentille un milieu qui joue par rapport à elle le rôle d'un prisme inverse. C'est-à-dire que, si l'on a une lentille convergente, il faudra lui accoler une lentille divergente, tellement calculée qu'elle change en faisceau cylindrique le faisceau conique qui sort de la lentille convergente. C'est, en effet, en accolant et en soudant ensemble deux lentilles, l'une convergente l'autre divergente que l'on arrive à produire un objectif achromatique.

En réalité l'achromatisme n'est jamais parfait, car on fait le calcul de manière à rendre les rayons rouges et les rayons violets parallèles à la sortie : mais il n'en

résulte pas que les rayons intermédiaires leur sont parallèles. Cela n'a jamais lieu, et l'on n'arrive pas à un achromatisme parfait.

Étude sommaire du spectre solaire. — Bien que cette étude sorte un peu du cadre de notre programme, il nous semble impossible de passer sous silence les faits curieux que l'on rencontre dans l'étude du spectre solaire.

Nous avons vu que le spectre présentait des rayons colorés compris entre le violet et le rouge. Si l'on cherche, soit avec un thermomètre sensible, soit avec la pile thermo-électrique que nous avons employée dans l'étude de la chaleur rayonnante, si l'on cherche l'intensité de chaleur qui règne aux divers points du spectre, on trouve que le maximum de chaleur se trouve au delà des rayons rouges dans la partie obscure, que l'on appelle partie des rayons infra-rouges.

Nous savons que la lumière décompose certaines substances chimiques, les sels d'argents par exemple, dont on recouvre les feuilles photographiques ; recevant l'image du spectre sur une feuille ainsi préparée, nous verrons que la décomposition ne se fait pas dans le rouge, qu'elle va en croissant à partir de là jusqu'au violet, et que le maximum se trouve dans la partie obscure située au delà du violet, dans la région des rayons ultra-violets.

Le spectre ne se compose donc pas uniquement de rayons lumineux, il comprend en outre des rayons calorifiques obscurs situés en deçà du rouge, et des rayons chimiques qui s'étendent au delà du violet dans la partie obscure. N'est-ce pas là un fait bien singulier, et qui nous porte à donner une origine commune à ces trois grandes manifestations de la matière : chaleur, lumière, électricité.

Le spectre solaire dont nous avons plus haut donné l'image, est sillonné de raies obscures remarquées et classées pour la première fois par Frauenhofer. Nous donnons ici une complète étude de ce phénomène, étude remarquable empruntée au cours professé par Verdet à l'École polytechnique.

Étude des spectres de diverses origines. — Le spectre solaire est caractérisé par la présence d'un très-grand nombre de raies obscures de largeurs très-inégales, distribuées de la façon la plus irrégulière. Les procédés photographiques constatent qu'il existe de semblables raies dans la partie du spectre, plus réfrangible que le violet, qui n'affecte pas notre œil, parce qu'elle est, suivant toute apparence absorbée dans les milieux réfringents avant d'arriver à la rétine. On doit présumer qu'il en existe aussi dans la partie moins réfrangible que le rouge, qui n'affecte pas non plus notre œil pour la même raison, et qui ne nous est sensible que par ses effets caloriques ; mais la délicatesse des appareils thermoscopiques n'est pas suffisante pour apprécier de petites solutions de continuité dans cette partie du spectre.

Le spectre des corps solides ou liquides incandescents est au contraire continu et s'étend d'autant plus vers le violet que la température est plus élevée; lorsque la température est suffisante, il contient une partie ultra-violette invisible, mais continue comme la partie visible. La partie infra-rouge, constituée par des rayonnements calorifiques obscurs, est donc aussi probablement continue. Si l'on rapproche ces divers faits, on peut exprimer la loi générale du rayonnement des corps solides et liquides en disant :

1° Qu'à de basses températures ce rayonnement ne contient que les rayons de réfrangibilité minima, insensibles pour notre vue, mais doués de la faculté calorifique ;

2° Qu'à mesure que la température s'élève, il s'ajoute à ce premier rayonnement des rayons de plus en plus réfrangibles ;

3° Que la température du *rouge* est celle où le rayonnement commence à

contenir une proportion sensible de rayons assez réfrangibles pour être perçus par l'œil ;

4° Que la température du *rouge blanc* est celle où l'accroissement de réfrangibilité des rayons émis atteint l'extrémité violette du spectre solaire visible ;

5° Qu'au-dessus de cette température le rayonnement contient des rayons ultra-violets invisibles pour notre œil, mais propres à modifier l'état de certains composés chimiques peu stables ou à développer dans divers corps le phénomène de la fluorescence.

Le spectre des gaz incandescents, c'est-à-dire des flammes gazeuses qui ne contiennent aucune particule solide en suspension, est discontinu et formé, en général, d'un petit nombre de bandes lumineuses assez larges. Le nombre de ces bandes augmente, en général, à mesure que la température s'élève, mais sans aucune loi régulière. La flamme du gaz à éclairage, celle de l'huile, de la cire, de la stéarine et, en général, des matières organiques riches en carbone, donnent un spectre continu, qui n'est que le spectre du charbon incandescent, dont la présence est l'origine du pouvoir éclairant de ces flammes. Lorsque, par un excès d'air ou d'oxygène, on détermine une combustion assez rapide pour n'être pas précédée d'une décomposition du gaz ou de la vapeur combustible, le spectre continu disparaît, et fait place à un spectre discontinu d'éclat incomparablement moindre. La partie inférieure de la flamme des bougies ou des becs de gaz donne un spectre de ce genre.

L'étincelle d'induction, produite dans un gaz (ou une vapeur) très-raréfié, entre des électrodes peu volatiles, donne un spectre discontinu, qui paraît être celui du gaz (ou de la vapeur) incandescent.

Enfin, l'arc voltaïque donne un spectre, constitué par un grand nombre de bandes brillantes souvent très-fines, irrégulièrement réparties du rouge au violet. Le nombre et la disposition de ces bandes dépendent principalement de la nature de l'électrode positive. Si cette électrode est un alliage, on retrouve dans le spectre les raies brillantes caractéristiques des métaux qui le constituent. Comme, d'ailleurs, l'observation directe montre que l'électrode positive ne cesse de se fondre et de se volatiliser, on doit admettre que l'arc voltaïque n'est qu'un courant de vapeur incandescente, et que le spectre qu'il fournit est le spectre du métal de l'électrode positive à l'état de vapeur.

Lorsque l'électrode positive est en charbon, la nature des vapeurs qui constituent l'arc voltaïque n'est pas déterminée avec certitude. Pour observer, dans ce cas, le spectre de l'arc, il faut écarter les charbons le plus possible ; lorsqu'ils sont voisins, la plus grande partie de la lumière est fournie par leur surface incandescente, et le spectre que l'on observe est la superposition du spectre continu du charbon avec les bandes brillantes du spectre de l'arc voltaïque. Lorsque les charbons sont très-rapprochés, ces bandes ne sont même plus aperçues.

On remarque fréquemment dans le spectre de l'arc voltaïque, et dans celu des lumières artificielles, une bande jaune, qui paraît occuper la place de la raie D du spectre solaire. M. Foucault, en éclairant une moitié de la fente nécessaire à la production du spectre par la lumière du soleil, et l'autre moitié par la lumière de l'arc voltaïque, a démontré que cette coïncidence est absolue ; la bande brillante s'est montrée à lui comme formée de deux bandes très-fines et très-rapprochées, exactement placées sur le prolongement des deux traits obscurs qui constituent la raie D de Fraunhofer. De plus, en faisant passer la lumière solaire à travers un arc voltaïque, dont le spectre présentait la double bande jaune dont il s'agit, il a rendu la raie obscure D du spectre incomparable-

ment plus accusée que dans le spectre de la lumière solaire directe. *Toutes les fois que l'arc voltaïque a la propriété d'émettre avec une grande intensité la lumière caractérisée par la réfrangibilité de la raie* D *de Fraunhofer, il a aussi la propriété d'absorber cette même lumière avec une grande énergie.*

M. Swan a, de son côté, expliqué la fréquente production de la double bande jaune, en montrant qu'elle ne diffère pas de celle qui constitue tout le spectre de la flamme monochromatique de l'alcool chargé de sel marin, et qu'on peut la produire à volonté, en introduisant dans une flamme une quantité minime d'un sel quelconque de sodium. Ainsi, une lame de platine de quelques centimètres carrés de surface, plongée dans de l'eau qui ne contient que $\frac{1}{50000}$ de son poids de sel marin, et portée ensuite dans la flamme d'un bec de gaz, suffit à développer cette raie brillante dans le spectre de la flamme; si dans un volume de 60 mètres cubes d'air, on fait détoner 3 milligrammes de chlorate de soude, mélangés de sucre de lait, on fait apparaître la raie brillante dans le spectre d'une flamme placée à l'extrémité du laboratoire la plus éloignée du point où a lieu la détonation, et elle y persiste pendant 10 à 15 minutes. La fréquence de cette raie indique donc simplement l'abondante diffusion des composés de sodium (surtout du sel marin) dans la nature; le moyen le plus délicat de déceler dans une matière la présence de ces composés est de l'introduire dans une flamme aussi chaude, et par elle-même aussi peu brillante que possible, et d'observer si la raie jaune apparaît dans le spectre.

Les découvertes de M. Swan et de M. Foucault ont été généralisées dans ces derniers temps par MM. Kirchhoff et Bunsen. En introduisant dans la flamme à peine visible, que donne le gaz à éclairage lorsque sa combustion est complète, de faibles quantités de divers sels métalliques, ils ont vu la flamme se colorer diversement, et donner naissance à un spectre formé de bandes brillantes étroites plus ou moins nombreuses, toujours identiques pour les divers sels d'un même métal, mais variables avec la nature de l'élément métallique. Dans le cas où le métal du sel est susceptible d'être employé comme électrode de l'arc voltaïque, le spectre ainsi produit ne se distingue que par une moindre intensité du spectre de l'arc auquel ce métal donne naissance, cette identité justifie complétement l'opinion qui ne voit dans la lumière de l'arc que la lumière d'une vapeur métallique incandescente, et qui ne considère l'électricité que comme la cause indirecte de la lumière dite électrique. L'éclat des raies brillantes étant d'autant plus vif, que la température de la flamme est plus élevée, il arrive souvent qu'en se servant de la flamme de l'alcool ou du gaz, on ne voit qu'une partie des raies brillantes que le métal est apte à produire, qu'on en voit un plus grand nombre avec la flamme du gaz mélangé d'oxygène, et un plus grand encore avec la flamme du chalumeau à gaz hydrogène et oxygène. Ces deux dernières flammes donnent assez d'éclat aux spectres pour qu'on puisse les projeter sur un tableau, et les rendre visibles à un nombreux auditoire.

En second lieu, toutes les flammes ainsi préparées absorbent les rayons de même réfrangibilité que ceux qu'elles émettent. L'interposition d'une de ces flammes fait apparaître dans le spectre solaire ou dans le spectre continu des charbons incandescents, qui transmettent l'arc voltaïque, des bandes obscures exactement correspondantes aux bandes brillantes du spectre de la flamme. On ne fait, en réalité, dans cette expérience que substituer la lumière de la flamme à la lumière de même réfrangibilité, émise par le soleil ou par les charbons incandescents; l'obscurité des bandes est un effet de contraste qui disparaît, si l'on supprime par un écran convenable les parties voisines du spectre solaire ou

du spectre électrique. Avec une flamme quelconque et un corps incandescent quelconque donnant par lui-même un spectre continu, l'expérience ne réussit qu'autant que la température du corps incandescent excède suffisamment celle de la flamme.

On a donné une forme intéressante à l'expérience du renversement des raies, dans le cas du sodium. Si l'on place un fragment de ce métal sur l'électrode positive de l'arc voltaïque, la chaleur que dégage le courant détermine la formation d'une atmosphère abondante de vapeurs de sodium autour du charbon incandescent, et le pouvoir absorbant de ces vapeurs fait apparaître dans le spectre la double raie obscure D. Au bout de quelque temps, cette atmosphère se dissipe, il ne reste plus de vapeurs de sodium que dans l'arc voltaïque, et la raie obscure est remplacée par la double bande brillante, caractéristique de cette vapeur incandescente.

Une importante série de conséquences découle de chacune des deux lois générales établies par MM. Kirchhoff et Bunsen. L'observation du spectre des flammes est devenu pour l'analyse chimique qualitative un procédé d'une sensibilité extraordinaire, qui a conduit déjà à la découverte de trois métaux alcalins nouveaux : le césium, le rubidium et le thallium, très-remarquables par leurs propriétés chimiques. L'expérience du renversement des raies a permis de comprendre l'origine des raies obscures du spectre solaire. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'admettre une hypothèse, évidente en quelque sorte par son seul énoncé, savoir : que le globe solaire est entouré d'une atmosphère, dont la température est moins élevée que celle du globe lui-même, mais qui, cependant, est assez chaude pour contenir un nombre très-varié de substances à l'état de vapeurs. Le pouvoir absorbant de ces vapeurs s'exerçant sur la lumière émise par le globe qu'elles environnent, transforme le spectre, probablement continu, que donnerait cette lumière, en un spectre, sillonné d'une multitude de raies obscures. On comprend que si un certain nombre de ces raies obscures coïncide avec les raies brillantes du spectre de diverses vapeurs incandescentes, on en pourra conclure avec une certaine probabilité la présence de ces vapeurs dans l'atmosphère solaire. La probabilité s'élèvera à la certitude, si, comme cela a lieu dans le cas du fer, on observe jusqu'à 70 coïncidences dans l'espace compris entre les raies E et F de Fraunhofer.

Les expériences faites jusqu'ici par M. Kirchhoff indiquent dans l'atmosphère solaire la présence des métaux suivants :

Potassium.	Magnésium.	Cobalt.
Sodium.	Zinc.	Nickel.
Calcium.	Fer.	Cuivre.
Baryum.	Chrome.	

Les métaux suivants paraissent, au contraire, y manquer :

Lithium.	Antimoine.	Mercure.
Strontium.	Plomb.	Silicium.
Aluminium.	Étain.	Argent.
Arsenic.	Cadmium.	Or.

On comprend l'intérêt que ce point de vue nouveau donne à l'étude du spectre des étoiles. Malheureusement, cette étude, abordée autrefois par Fraunhofer, et reprise, il y a peu d'années, par M. Donati, n'a pas donné de résultats très-concluants. On sait seulement que les raies principales de ces spectres ne sont pas

les mêmes que celles du spectre solaire. L'observation n'est, d'ailleurs, possible que pour les étoiles de première grandeur, sous un ciel très-pur, et à la condition de concentrer un large faisceau de lumière sur la fente étroite des appareils, au moyen d'une lentille de grande surface.

Interférences. — La lumière se compose-t-elle de particules spéciales infiniment ténues envoyées jusqu'à nous par les corps lumineux? Newton répondait oui, et expliquait les divers phénomènes de l'optique en supposant aux diverses couleurs simples des vitesses différentes. C'est ce qu'on appelle la théorie de l'émission.

Elle explique suffisamment quelques faits, mais il est des phénomènes qui se trouvent complétement en désaccord avec elle, celui des interférences par exemple.

De la lumière ajoutée à de la lumière peut donner de l'obscurité. Cela ne se conçoit pas avec la théorie de l'émission. Mais on le comprend sans peine avec la théorie des ondulations : « La lumière est un état vibratoire transmis des sources lumineuses jusqu'à nous par l'intermédiaire d'un fluide élastique impondérable, répandu dans les espaces: ce fluide hypothétique est l'éther qui transmet les vibrations destinées à produire sur nous par l'intermédiaire de l'œil les sensations lumineuses, comme l'air transmet les vibrations destinées à produire par l'intermédiaire de l'ouïe les sensations sonores. » A chaque couleur simple correspond une longueur d'ondulation différente : c'est en partant de ces principes que l'illustre Fresnel arriva par son puissant génie à mettre au jour ces expériences et ces calculs qui font de l'optique une science vraiment mathématique. Quelques principes simples et tout le reste en découle ; tous les résultats du calcul se vérifient par l'expérience. Faut-il en conclure l'existence réelle de l'éther? Non certainement, car notre esprit ne saurait le concevoir : mais tous les faits se passent comme si l'éther existait réellement.

Le phénomène des interférences, qui se manifeste surtout dans l'expérience des anneaux colorés, s'explique bien par ce fait que deux rayons ou vibrations concourantes s'ajoutent ou se retranchent suivant qu'elles sont de même sens ou de sens contraire. Il en résulte soit un renforcement, soit une diminution plus ou moins complète dans l'intensité de la lumière.

PRINCIPAUX INSTRUMENTS D'OPTIQUE

Réticles. — Pour en comprendre l'emploi, il est nécessaire de décrire sommairement l'organe de la vue : L'œil est un globe irrégulier dont les parois se composent d'une membrane fibreuse S, la sclérotique, elle est opaque et devient transparente seulement en T pour livrer passage aux rayons lumineux : T est la cornée transparente. C est une lentille charnue transparente, le cristallin ; il est baigné de liquides et constamment humide, sauf le cas de maladie ; en avant du cristallin est l'humeur aqueuse, en arrière est le corps vitré qui remplit tout l'intervalle jusqu'à la sclérotique. La lumière traverse ces milieux (cornée transparente, humeur aqueuse, cristallin, corps vitré), se réfracte en les traversant, et vient frapper la membrane nerveuse R, appelée rétine ; la rétine perçoit les sensations et les transmet au cerveau par le nerf optique N. En avant du cristallin

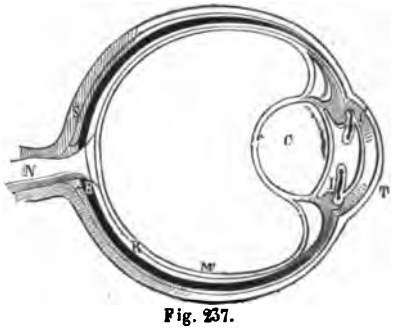


Fig. 237.

existe une membrane annulaire ll', facilement contractile, qui permet à la lumière de s'introduire en plus ou moins grande abondance.

Sans entrer dans plus de détails, nous dirons que, pour chaque individu, il y a une distance fixe, à laquelle il faut placer un objet pour l'apercevoir distinctement, c'est la distance de la vision distincte. Pour une bonne vue ordinaire, cette distance est de 30 centimètres. On est myope, lorsqu'on n'aperçoit nettement que les objets placés à une distance inférieure à celle de la vue distincte ; on est presbyte dans le cas contraire. Ces défauts se corrigent, pour les myopes par l'emploi de besicles à verres concaves ou lentilles divergentes, et pour les presbytes par l'emploi de besicles à verres convexes ou lentilles convergentes.

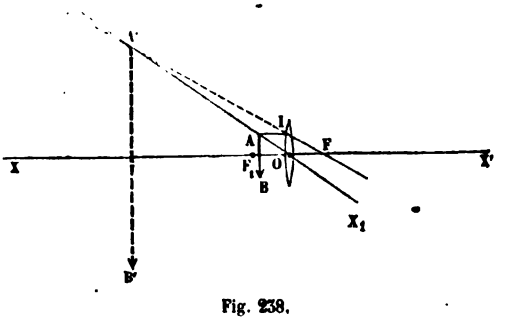


Fig. 238.

Loupe, microscope. — La loupe est le microscope simple, elle sert à amplifier l'image des petits objets. C'est une lentille convergente que l'on place devant l'œil et très-près (Voir la théorie des lentilles convergentes) ; il se forme une image virtuelle A'B' de l'objet AB, image agrandie, dont la distance à l'œil est celle de la vue distincte.

Soit I la grandeur de l'image, O celle de l'objet, le grossissement $G = \frac{I}{O}$, et l'on a d'après la figure $G = \frac{I}{O} = \frac{OA'}{OA} = \frac{p'}{p}$.

p' est constant pour un individu donné; c'est la distance D de sa vue distincte ;

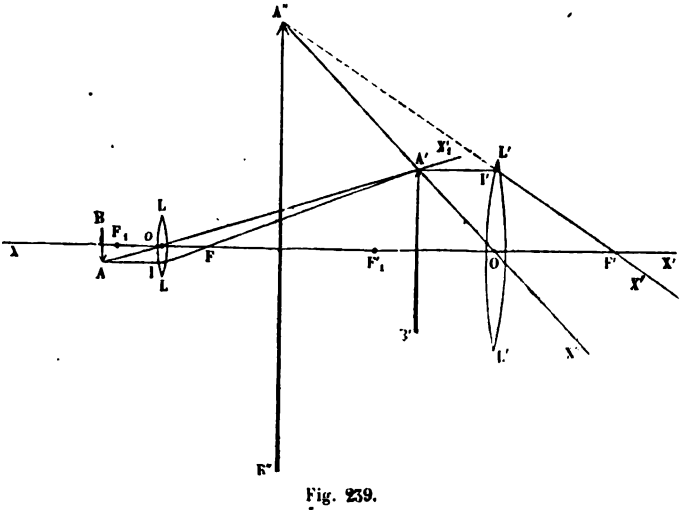


Fig. 239.

d'autre part on a la formule que nous avons démontrée $\frac{1}{p} - \frac{1}{D} = \frac{1}{f}$, d'où $p = \frac{Df}{D+f}$, donc $G = \frac{p'}{p} = 1 + \frac{D}{f}$.

Le microscope composé est l'instrument précédent perfectionné, il grossit les objets jusqu'à 700 et 800 fois sans en altérer les contours :

AB est l'objet donné, placé devant la lentille convergente LL appelée objectif ; l'objet étant au delà du foyer principal F_1, son image se forme en A'B', A' et B' étant les foyers conjugués de A et B. Une seconde lentille convergente, l'oculaire L'L' est placée au delà de l'image A'B' de telle sorte, que cette image soit entre la lentille et le foyer principal F'_1. L'œil qui regarde à travers l'oculaire perçoit une image virtuelle et agrandie A''B'' rejetée à la distance de la vue distincte. Il y a deux fois grossissement. L'oculaire doit être mobile, afin de pouvoir s'accommoder à la vue de l'observateur.

Grossissement : si l'objet est rendu dix fois plus grand par l'objectif, et que l'image A'B' soit rendue dix fois plus grande par l'oculaire ; il est clair que l'image finale A''B'' sera cent fois plus grande que l'objet ; le grossissement $G = \frac{l}{O} = \frac{A''B''}{AB}$ est le produit des deux grossissements partiels,

Donc $G = \frac{A'B'}{AB} \times \frac{A''B''}{A'B'}$, or, la théorie des lentilles et de la loupe donne :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p} = \frac{f}{p-f} \qquad \frac{A''B''}{A'B'} = 1 + \frac{D}{f'} \qquad \text{Donc } G = \frac{f}{f'} \times \frac{D+f'}{p-f}.$$

Le grossissement varie, pour un instrument donné, suivant la distance D de la vision distincte de l'observateur et suivant la distance p de l'objet à l'objectif.

Nous donnons (*fig.* 240) le dessin d'un microscope :

Le porte-objet P est un anneau qui supporte des lames de verre sur lesquelles on dépose les objets à examiner ; ces objets sont vivement éclairés par le miroir réflecteur M ; O est l'objectif ; O' est l'oculaire contenu dans un tube mobile à frottement doux dans le tube T ; V' est la vis qui permet de rapprocher le porte-objet de l'objectif.

Fig. 240.

Lunette de Galilée. — C'est la plus ancienne et la plus simple ; elle servit entre les mains de son auteur à la découverte des premiers phénomènes astronomiques ; c'est aujourd'hui notre lorgnette de spectacle.

Elle a pour objectif une lentille convergente L et pour oculaire une lentille divergente L'. L'objectif Ll tend à donner de l'objet éloigné AB une image A'B' conjuguée de AB ; cette image est renversée ; mais le tuyau porte-oculaire est mobile et l'on peut placer la lentille L' en avant de l'image A'B', et les rayons lumineux qui traversent cette seconde lentille semblent émaner de l'objet A''B''. A'' B'' est une image renversée de A'B', et par suite une image droite de l'objet donné.

Il est facile de construire les images en appliquant la règle donnée dans la

théorie des lentilles pour trouver le foyer conjugué d'un point donné (*fig.* 241,242).

Lunette astronomique. — Destinée à l'observation des astres, elle se compose de deux lentilles convergentes. C'est un instrument analogue au microscope; la marche des rayons lumineux y est semblable, seulement l'objectif L est beaucoup plus grand que l'oculaire L'. Le point A donne une image A' qui s'obtient par l'intersection de la ligne AO joignant A au centre optique de la lentille avec la ligne IF qui joint le point de rencontre de la parallèle à l'axe principal au foyer principal F de la lentille. L'image B' de B s'obtient de même, et A'B' est l'image

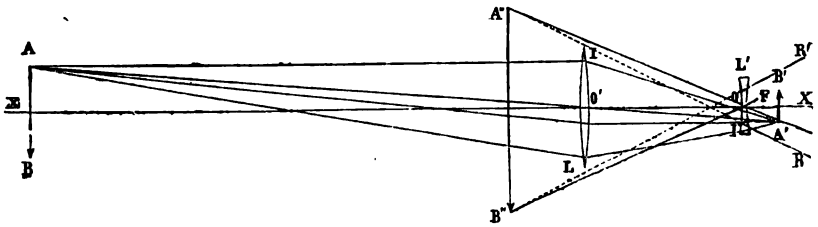


Fig. 241.

de AB. A'B' est située entre l'oculaire et son foyer principal F'_1. Il y a donc pour l'observateur, placé à droite de l'oculaire, formation d'une image virtuelle A''B''. Ici l'image est renversée, ce qui importe peu en astronomie (*fig.* 243).

Dans la pratique, l'objet donné est à une distance que l'on peut supposer infinie, de sorte que l'image A'B' se forme sensiblement au foyer principal F de l'objectif. Pour la lunette astronomique, comme pour la lunette de Galilée, on appelle grossissement le rapport de l'angle sous lequel on voit l'image à l'angle sous lequel on verrait l'objet. L'angle sous lequel on verrait l'objet est AO'B, et, vu l'éloignement de l'objet, on peut le remplacer par AOB ou par son égal A'OB'; l'angle sous lequel on voit l'image est A''O'B'' ou A'O'B'. Le grossissement est donc le rapport $\frac{A'O'B'}{A'\widehat{OB'}}$ que l'on peut, à cause de la petitesse des angles, remplacer par le rapport de leurs tangentes trigonométriques $\frac{A'B'}{O'C'}$ et $\frac{A'B'}{OC'}$, soit $\frac{OC'}{O'C'}$. Or, $OC' = F$ et $O'C'$ diffère peu de f, donc $G = \frac{F}{f}$.

Fig. 242.

Avec un microscope, on peut déplacer l'objet; avec une lunette astronomique, on ne peut le faire, aussi faut-il recourir à un déplacement plus étendu de l'oculaire.

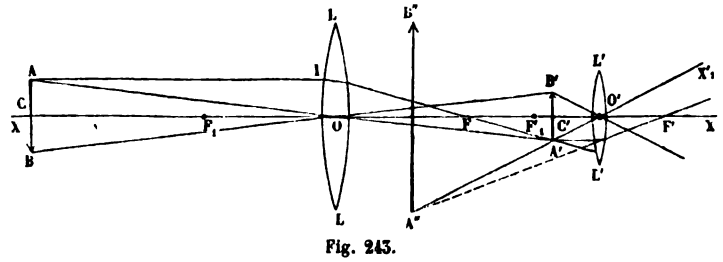


Fig. 243.

Nous donnons (*fig.* 244) un dessin de la lunette astronomique.

Pour la diriger approximativement vers l'astre que l'on veut apercevoir, on se sert d'une petite lunette ou chercheur C dont le champ est beaucoup plus vaste. Dans la lunette astronomique, le grossissement ne dépasse guère 1000 à 1200 fois la grandeur apparente de l'objet.

Fig. 244.

Le champ d'une lunette est l'angle au sommet du cône de l'espace que l'on peut apercevoir à travers l'instrument. Les rayons émanés de A et recueillis par l'objectif forment un cône LAL (*fig.* 245) qui, après réfraction, devient LA'L, et c'est la seconde nappe de ce cône qui peut rencontrer ou ne pas rencontrer l'oculaire. On admet que le point A cessera d'être distinctement visible, lorsque l'axe secondaire correspondant au point A touchera le bord de la lentille L'L'. Le champ est donc mesuré par l'angle AOB ou par son égal L'OL', ou bien encore, vu la faible grandeur de cet angle par sa tangente astronomique $\frac{L'L'}{OO'}$ ou $\frac{L'L'}{F+f}$.

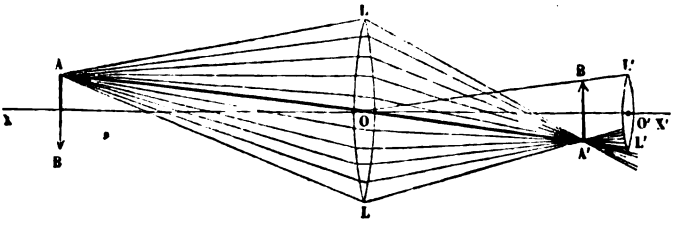


Fig. 245.

Lunette terrestre. — Pour la longue-vue ou lunette terrestre, il est important de ne pas avoir des images renversées. On ajoute donc à la lunette astro-

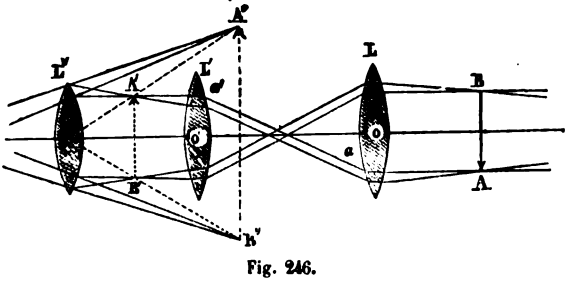


Fig. 246.

nomique deux lentilles convergentes L et L' que l'on interpose entre le véritable

oculaire L'' et l'image AB donnée par l'objectif. Cette image se forme au foyer principal de la lentille L, le point A est donc le foyer principal de l'axe secondaire AO, et les rayons émanant de A sortent de la lentille L en faisceau cylindrique *aa'*, lequel faisceau redevient conique après avoir traversé L' et donne en A' l'image de A. On obtient ainsi l'image A'B' égale à AB, si les deux lentilles sont identiques, mais A'B' est renversée par rapport à AB, c'est-à-dire de même sens que l'objet. La lentille L'' reprend l'image A'B' et l'agrandit pour donner A''B'', image définitive.

Télescopes. — Les télescopes sont aussi destinés à observer les astres, mais ils sont basés sur la réflexion des rayons lumineux à la surface des miroirs courbes et en particulier des miroirs paraboliques, que M. Foucault est arrivé à construire avec une grande perfection. Les rayons parallèles à l'axe vont, après réflexion, concourir au foyer géométrique de la parabole génératrice.

Principes des appareils lenticulaires des phares. — Les phares datent d'une haute antiquité. Leur nom vient de la tour construite sur l'île de Pharos près d'Alexandrie (Égypte), tour qui servait à marquer aux navigateurs l'entrée du Nil. Cette merveille du monde fut longtemps le type de nos phares : une tour élevée se terminait par une plate-forme où l'on brûlait du bois et du charbon : plus tard on recourut aux chandelles, puis aux huiles de colza, aux huiles minérales, au gaz d'éclairage, et enfin on commence aujourd'hui à se servir de la lumière électrique.

Dans un phare, il n'est besoin que d'éclairer la partie de la zone horizontale qui regarde la mer : tout rayon lumineux, envoyé en dehors de cette zone est perdu. Les perfectionnements successifs ont eu pour but de ramener à l'horizon les rayons perdus et d'augmenter l'intensité de la source lumineuse.

En 1783, Teuler, ingénieur de la généralité de Bordeaux fit usage d'une couronne de miroirs paraboliques à axe horizontal ; au foyer de chacun brûlait une lampe à mèche plate. En donnant à l'appareil un mouvement de rotation autour d'un axe vertical, tous les miroirs, l'un après l'autre, venaient éclairer un point de l'horizon. On avait ce qu'on appelle aujourd'hui un phare à éclipses. Mais les lampes à mèche plate donnaient peu de lumière, chacun sait en effet que ces lampes sont fumeuses, et que la mèche se charbonne, en un mot qu'il y a combustion incomplète de l'huile. A quoi tient cette combustion incomplète ? A l'insuffisance de l'appel d'air. Pour y remédier, Teuler eut l'idée d'employer une mèche cylindrique creuse, la mèche usuelle de nos lampes d'aujourd'hui : la flamme est entourée d'air de toutes parts et la combustion est complète. Quelques temps après, Argan trouva à son tour la lampe à double courant d'air et le nom de Teuler, le premier inventeur, fut oublié. Aujourd'hui, on se sert dans les phares de lampes à deux, trois et quatre mèches, cylindriques et concentriques.

Quand on a un miroir parabolique avec une flamme au foyer, cette flamme ne se réduit pas à un point mathématique ; les rayons qui émanent de ces divers points ne se transforment pas en faisceaux cylindriques, mais en faisceaux coniques, et l'angle maximun au sommet de ces cônes indique l'étendue de la zone éclairée par le miroir.

Les éclipses ne sont point le seul inconvénient de ces miroirs paraboliques, un inconvénient plus sérieux est que ces réflecteurs absorbent la moitié de la lumière incidente, et sont très-vite ternis par l'air de la mer.

C'est en 1819 que Fresnel eut l'idée de les remplacer par des lentilles de verre. Placez au foyer principal d'une lentille un point lumineux ; les rayons, après leur passage à travers la lentille, formeront un faisceau cylindrique parallèle à l'axe

principal. Mais la source lumineuse a une certaine surface, de sorte que les rayons émanés des divers points se transformeront en faisceaux coniques : le maximum de l'angle au sommet de ces cônes donnera le champ de la lentille, c'est-à-dire que cet angle comprendra tous les points plus ou moins éclairés par l'appareil.

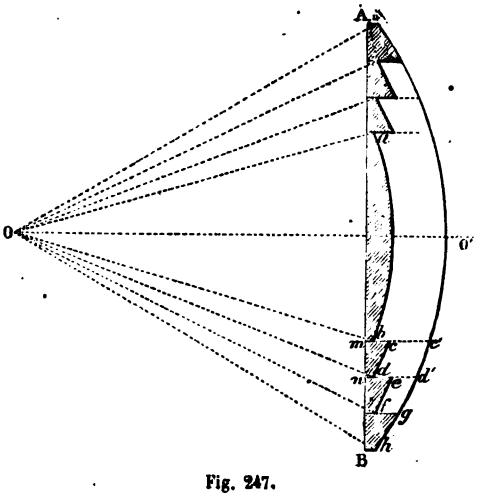


Fig. 247.

Le grand avantage des lentilles est une perte moindre de lumière; les lentilles minces en effet ne perdent que 1/20 de la lumière qu'elles reçoivent. Mais, dans le cas actuel, il fallait des lentilles énormes et par suite très-épaisses qui eussent absorbé beaucoup de lumière en admettant qu'on ait pu les fabriquer : c'est là que nous rencontrons la grande invention de Fresnel : la lentille à échelons.

Elle se compose d'une partie centrale *ab*, qui est une lentille ordinaire plan-convexe, et de parties accolées à cette partie centrale, qui sont formées d'anneaux ou de tores engendrés par la rotation de l'élément *cdmn* autour de l'axe OO'. Un élément (*cdmn*) est limité par trois faces planes et par une face courbe (*cd*) calculée de façon à avoir son foyer principal au point O; on remplace dans la pratique cette face courbe par son cercle osculateur. Nous avons donc un ensemble n'ayant qu'un foyer, le point O.

Cette forme de lentille nous permet de supprimer l'aberration de sphéricité ; nous avons vu en effet qu'en réalité le foyer principal d'une lentille ne se réduisait pas à un point, mais que tous les rayons parallèles à l'axe principal et refractés par la lentille formaient par leurs intersections successives une surface (la caustique par réfraction). Ici nous pouvons réduire de beaucoup l'étendue de cette surface en prenant pour l'arc (*cd*) non pas l'arc (*c'd'*) transporté parallèlement à lui-même, mais un arc modifié et calculé de façon à avoir le point O pour foyer.

En faisant tourner la section AB autour de l'axe horizontal *OO'*, nous avons formé un panneau qui, vu les dimensions de la flamme, éclaire un cône de l'horizon. Si l'on accole plusieurs panneaux égaux de manière à former un tambour hexagonal ou octogonal par exemple, qu'on donne à ce tambour un mouvement de rotation autour de son axe vertical, on aura un feu à éclipses et à éclats successifs.

En faisant tourner la section AB d'une lentille à échelons autour de la verticale, on obtient une surface de révolution qui éclaire également tous les points de l'horizon. On a construit un feu fixe.

Dans tout cela nous voyons que les rayons dirigés vers le haut et vers le bas sont perdus. Fresnel se proposa de les ramener à l'horizon ; il employa d'abord de petites portions de miroirs paraboliques à axe horizontal qui renvoyaient les rayons dans la direction voulue. Puis il eut recours à des prismes disposés comme le montre la figure 248 (système catadioptrique).

Le rayon envoyé du point O sur la face *ab* du prisme la traverse et se réfracte

de manière à venir frapper la face *ac*, on calcule l'angle d'incidence de telle sorte, qu'il y ait réflexion totale sur la face *ac*, et que le rayon émerge du prisme horizontalement.

L'appareil destiné à recueillir les rayons du bas est le même disposé en sens contraire. Dans l'appareil pour feu fixe, les zones catadioptriques sont engendrées par la rotation des prismes tels que (*abc*) autour de l'axe vertical.

Pour varier des feux, on a d'abord le nombre des éclipses et des éclats à la minute, puis la coloration rouge ou bleue. La couleur rouge est la plus employée car elle est moins absorbée par les brouillards. Les colorations et éclats s'obtiennent soit par une enveloppe fixe en verre coloré, soit par un panneau de verre coloré, animé d'un mouvement de rotation autour de l'axe de la lanterne.

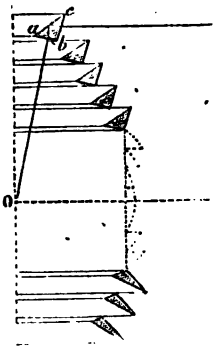


Fig. 248.

La lampe à quatre mèches équivaut à 22 becs ordinaires de carcel. Elle donne dans les feux fixes un éclat égal à 600 becs et, dans les feux tournants un éclat qui va jusqu'à 5,400 becs. Il est urgent que l'huile arrive toujours en excès à la mèche, afin de rafraîchir les garnitures métalliques et d'en empêcher la détérioration rapide.

Nous avons vu en parlant de la lumière électrique, qu'on était arrivé à régler la marche de deux charbons entre lesquels elle se produit, de manière à obtenir une intensité constante. C'est alors qu'on a pu employer cette source lumineuse à l'éclairage des phares et l'expérience se poursuit en ce moment aux deux phares de la Hève, près du Havre. On se sert des courants d'induction donnés par une machine magnéto-électrique que met en marche une machine à vapeur, et l'on arrive de la sorte à produire un éclat qui va jusqu'à 2,500 becs carcel dans un feu tournant.

La lumière électrique exige des appareils lenticulaires de petite proportion, car la flamme se trouve réduite à de petites dimensions, tous ses points sont peu éloignés du foyer principal ; avec un appareil à lampe ordinaire, la lumière électrique ne donnerait qu'un faisceau cylindrique, et n'éclairerait qu'une petite bande de l'horizon. Ce serait là un grave inconvénient, il faut que la lentille donne un faisceau conique d'une certaine ouverture afin que tous les navires puissent apercevoir le phare. Pour conserver l'angle de dispersion, on réduit donc les dimensions de l'appareil dans le rapport des dimensions de la flamme d'une lampe à celles de la lumière électrique.

Il faut en outre débarrasser l'appareil de tous ses montants verticaux, car, vu la faible étendue de la source lumineuse, ils laisseraient dans l'obscurité des angles de l'espace présentant une assez grande étendue.

NOTIONS SUR LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

Sources mécaniques de chaleur. — Toutes les fois que, par une action mécanique quelconque, on vient à modifier la forme ou les dimensions d'un corps ou à produire un frottement, il y a dégagement ou absorption de chaleur. Quand on produit dans l'état d'un corps une modification qui résulterait d'un abaissement de température, il y a dégagement de chaleur ; si la modification est de celles qui pourraient résulter d'une élévation de température, il y a absorption de chaleur.

C'est ainsi que l'air comprimé brusquement dans le briquet à air dégage assez de chaleur pour enflammer un morceau d'amadou. De même, lorsqu'un corps solide éprouve un accroissement de densité, par exemple du laiton qui passe à la filière, une balle de plomb que l'on aplatit sous un marteau, une médaille que frappe le balancier d'une presse monétaire, il y a dégagement de chaleur facile à constater. Avec la pile thermo-électrique, on constate un refroidissement du fil métallique que l'on étire.

Voici maintenant quelques effets calorifiques du frottement : lorsque l'on fore un canon au moyen d'un outil d'acier, il y a un grand développement de chaleur, il en est de même lorsqu'avec une tarière on perce un trou dans du bois ou du métal ; deux morceaux de glace frottés l'un contre l'autre se résolvent en eau par l'effet de la chaleur dégagée ; les sauvages se procurent du feu en frottant l'un contre l'autre deux morceaux de bois. Il n'est pas nécessaire qu'il y ait usure pour que de la chaleur se dégage : le frottement sans usure peut en faire naître.

Relation entre le travail consommé et la chaleur produite par le frottement. — Pour bien comprendre ce qui va suivre, il est nécessaire de se reporter à la théorie des forces et du travail que l'on expose en mécanique. Une force se mesure en kilogrammes par le moyen du dynamomètre ; mais le travail d'une force dépend 1° de l'intensité de cette force et 2° de la distance parcourue par le point d'application ; le travail s'exprime en kilogrammètres, il est le produit de la force par l'espace parcouru. S'agit-il d'élever un fardeau, on devra tenir compte dans l'évaluation du travail et du poids de ce fardeau, et de la hauteur à laquelle on l'élève ; si le fardeau devient deux fois moindre, et la hauteur deux fois plus grande, le travail reste le même ; si le fardeau ne bouge pas, le travail est nul. Nous démontrerons en mécanique que le travail des forces, qui agissent sur un système matériel donné dans un laps de temps déterminé, est mesuré par la somme des demi-variations des forces vives de tous les points du système. (La force vive d'un point matériel de masse m et de vitesse v est mv^2).

L'équation du travail se met alors sous la forme générale :

$$T = \Sigma \left\{ \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2 \right\}$$

expression dans laquelle T est la somme du travail de toutes les forces qui agissent sur le corps depuis le temps t_0 jusqu'au temps t ; v et v_0 sont les vitesses finale et initiale d'un point du système de masse m. Nous verrons plus tard que cette équation régit toute la théorie des machines.

Ceci posé, « lorsque deux surfaces frottant l'une contre l'autre n'éprouvent aucune usure sensible, la situation relative des molécules qui les composent étant la même à diverses époques, alors on a en tout point du système $v = v_0$, et le travail des forces moléculaires entre deux quelconques de ces époques est rigoureusement nul. Le travail de la force mécanique par laquelle le frottement est entretenu n'a donc alors pour équivalent ni un véritable travail résistant ni des forces vives directement perceptibles, et il est naturel de lui chercher un équivalent dans la chaleur que le frottement développe. »

« Nous avons vu en optique que la théorie des ondulations était aujourd'hui bien démontrée, et que la lumière comme la chaleur était le résultat d'un mouvement vibratoire transmis à travers les corps. Lorsqu'un corps s'échauffe, il absorbe des rayons de chaleur, il détruit la force vive due au mouvement vibratoire de ces rayons. La chaleur et la lumière sont donc des phénomènes purement

mécaniques. Si le phénomène qui donne l'unité de chaleur n'est qu'un phénomène mécanique équivalent à une quantité de travail déterminée, toutes les fois que l'on voudra élever de 0° à 1° un kilogramme d'eau, il faudra dépenser précisément cette quantité de travail ; il en faudra dépenser m fois plus pour dégager m unités de chaleur ; en d'autres termes, il devra exister entre la quantité de travail dépensé et la quantité de chaleur produite un rapport constant indépendant de la nature des substances frottantes, et c'est à ce rapport que l'on donne le nom d'équivalent mécanique de la chaleur. »

Expériences de Joule. — Cet équivalent peut se mesurer par les expériences de Joule : Deux poids Q et Q′ enroulés sur deux tambours A et A′ tombent le long de règles graduées, ils entraînent les tambours T et T′ et par suite les cordes C

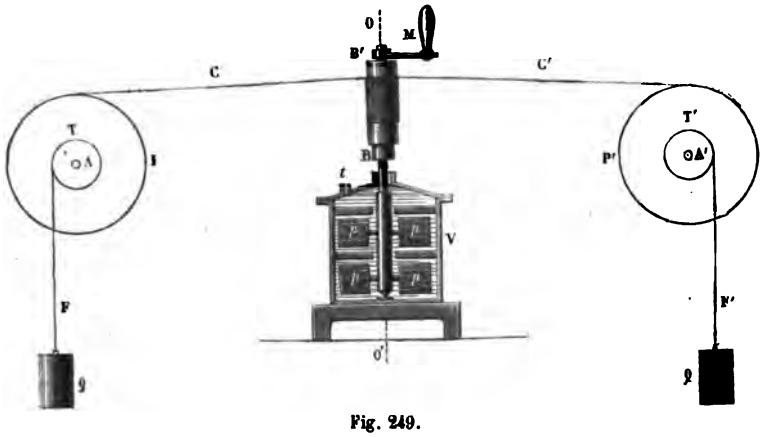


Fig. 249.

et C′ enroulées en sens contraire sur le cylindre BB′. Il en résulte que ce cylindre prend, sous l'action des poids qui tombent, un mouvement de rotation, lequel se communique à l'axe OO′ et par suite aux palettes (p) enfermées dans le vase V plein de liquide. Le mouvement des palettes tend à s'accélérer à mesure que les poids tombent, mais le frottement du liquide s'oppose à cette accélération, le mouvement uniforme s'établit, les forces vives restent constantes à deux époques quelconques de ce mouvement. Le travail mécanique dû à la chute des poids se mesure par le produit de ces poids et des distances qu'ils ont parcourues : ce travail tout entier disparaît en chaleur, il y a échauffement du liquide, et, avec des thermomètres sensibles, en tenant compte du rayonnement du vase et des chaleurs spécifiques du liquide et du métal, on mesure assez exactement la quantité de chaleur développée. Le rapport entre le travail dépensé et cette quantité de chaleur est ce que nous avons appelé l'équivalent mécanique de la chaleur. M. Joule a obtenu de la sorte pour l'équivalent mécanique de la chaleur la série de valeurs suivantes dont l'accord est très-remarquable :

Eau avec palettes en laiton.	424,9
Mercure avec palettes en fer.	425,4
Frottement de la fonte sur elle-même.	426,4

« En observant l'échauffement de l'eau forcée par une pression déterminée à traverser un diaphragme poreux, M. Joule a encore obtenu le nombre 425. »

Nous nous bornerons à cette expérience en ajoutant seulement que les nombres trouvés de cette manière sont parfaitement d'accord avec ceux que donne la compression d'un gaz chassant un liquide devant lui, ou bien encore l'étude de la dilatation des gaz ou des transformations que subit l'eau dans la machine à vapeur. En mécanique, quand nous ferons le calcul des machines à vapeur, nous aurons occasion de revenir sur cette théorie féconde de l'équivalence de la chaleur et du travail, que l'on peut résumer comme il suit :

« 1° Toutes les fois qu'une dépense ou une production de travail ou de forces vives paraît n'avoir aucun équivalent mécanique, cet équivalent est une production ou une consommation de chaleur ;

2° Toutes les fois qu'un phénomène physique paraît impliquer non-seulement une communication de chaleur entre les corps différents, mais une véritable production ou consommation de chaleur, il y a en même temps dépense ou production de travail ou de forces vives.

3° Le rapport d'équivalence du travail et de la chaleur est le même dans tous les ordres de phénomènes, et sensiblement égal à 424,5. »

CHIMIE

CHAPITRE PREMIER

OBJET DE LA CHIMIE

Corps simples et composés. — Différents états des corps.— Force d'agrégation et de cohésion.— Affinité chimique. — Lois des proportions multiples. — Équivalents. — Nomenclature chimique : acides, bases, sels. — Division des corps simples en métaux et en corps non métalliques ou métalloïdes.

La physique nous a fait connaître un ordre de phénomènes qui se produisent dans les corps au contact d'autres corps ou sous l'influence de forces naturelles telles que la chaleur, l'électricité. Le caractère de ces phénomènes est que l'effet disparaît avec la cause : une barre de fer portée de 15° à 100° se dilate, mais ramenée à 15° elle reprend sa forme et ses dimensions premières: le fer doux au contact d'un aimant devient un autre aimant, mais il perd ses propriétés magnétiques quand on éloigne le barreau aimanté ; si l'on dissout du sel marin dans l'eau, et qu'on évapore ensuite le liquide, on trouve comme résidu le sel qu'on avait mis.

Les phénomènes chimiques, au contraire, se produisent au contact intime des corps ou sous l'influence des forces naturelles que nous connaissons, mais ils modifient d'une manière permanente la structure externe et interne des substances: le fer exposé à l'air humide se rouille et finit par disparaître en plaquettes rougeâtres, il s'est formé un nouveau corps tout différent du métal, c'est de l'oxyde de fer.

Un courant électrique qui passe à travers l'eau, la décompose en deux gaz de propriétés différentes, l'hydrogène et l'oxygène. Un gaz vert, le chlore, est mêlé à un autre gaz l'hydrogène, et le mélange placé dans un ballon de verre est exposé à la lumière solaire : souvent il se produit une détonation et les deux gaz se combinent en un gaz incolore, l'acide chlorhydrique. — Les sels d'argent exposés à la lumière solaire se décomposent, ils noircissent, et cette propriété est la base de la photographie.

Nous remarquons dans tous ces faits des modifications permanentes, et si de plus nous opérons les balances à la main, nous voyons que les poids de matière, sur lesquels on agit, restent constants quelles que soient les transformations subies: donc la matière est indestructible, et, suivant le fécond principe posé

par Lavoisier à la fin du siècle dernier, « rien ne se perd, rien ne se crée dans la nature. »

Corps simples et composés. — Parmi les corps qui nous entourent, les uns sont susceptibles de se résoudre en plusieurs autres : ainsi, la craie portée au rouge abandonne un gaz, l'acide carbonique, et il reste de la chaux : la chaux elle-même se résout en deux autres substances, un métal, le calcium et un gaz, l'oxygène.

D'autres corps sont simples, c'est-à-dire que, si l'on agit sur eux par tous les moyens connus, il est presque toujours facile de leur ajouter quelque chose, d'augmenter leur poids, mais on ne peut arriver à leur enlever une partie de ce poids. Est-ce à dire que ces corps soient réellement simples et indécomposables, et que la nature ait créé un certain nombre de types primordiaux destinés à engendrer toutes les substances ? La raison répugne à admettre cette hypothèse, et conçoit plutôt l'existence d'une substance unique, mère de tous les corps de la nature.

Nous appellerons donc corps simples ceux que l'homme n'a pas encore décomposés, mais qu'il arrivera peut-être à résoudre lorsque la science lui aura donné des moyens d'action plus énergiques,

Différents états des corps. — Nous avons vu en physique que les corps se présentaient à nous sous trois états différents : solide, liquide, gazeux. Un même corps passe de l'un de ces états à l'autre à mesure qu'on l'échauffe ; la cohésion, ou l'adhérence des molécules entre elles, a pour antagoniste la chaleur ; si la cohésion l'emporte, le corps est solide ; augmentez la chaleur, le corps devient liquide, la cohésion est nulle, et le corps épouse la forme du vase qui le renferme ; augmentez encore la chaleur, vous obtiendrez un gaz, qui tend sans cesse à augmenter de volume et à occuper tout l'espace qu'on lui offre ; il n'y a plus cohésion, mais il y a répulsion entre les molécules. On est arrivé dans ces derniers temps à fondre des substances, comme le platine, réputées presque infusibles : on a ramolli le charbon ; d'un autre côté, on a trouvé des froids assez intenses pour liquéfier des gaz, considérés jusqu'alors comme permanents ; on a liquéfié l'acide carbonique, on l'a même solidifié. Toutefois certains gaz ont trompé tous les efforts ; l'oxygène, l'hydrogène, l'azote n'ont pu être liquéfiés ; tout porte à admettre qu'ils le seront un jour, et l'on peut dire que tous les corps sont susceptibles de se présenter sous les trois états : solide, liquide et gazeux.

Affinité chimique. — Les phénomènes ou réactions chimiques se produisent au contact intime des corps. Ainsi, dissolvez dans un vase un peu de la substance appelée baryte, et approchez-en une baguette de verre au bout de laquelle est suspendue une goutte d'acide sulfurique ; approchez la goutte aussi près que vous voudrez du liquide, il ne se produira rien, mais au moment où le contact a lieu, vous verrez apparaître une poussière blanche qui se précipite au fond du vase, c'est du sulfate de baryte. On peut constater avec le microscope que deux gouttes, l'une d'une dissolution de baryte, l'autre d'acide sulfurique, n'agissent réellement qu'au contact. La force qui produit les réactions chimiques n'est donc pas comparable à l'attraction qui fait graviter les planètes autour du soleil, ni à la force d'agrégation qui réunit les molécules d'un même corps ; elle s'exerce au contact intime et on l'appelle affinité chimique. L'affinité est la mesure de la facilité et de l'énergie avec laquelle deux corps se combinent ; il ne faut y voir qu'un mot et une définition : on dit par exemple que l'acide sulfurique et la baryte ont une grande affinité, parce qu'ils se combinent rapidement et énergiquement

et que leur union est très-difficile à détruire. Au contraire, deux corps qui n'agissent l'un sur l'autre que dans certaines conditions, et dont le composé est détruit par le moindre choc, ont une faible affinité. Entre beaucoup de substances l'affinité est nulle.

Dans le langage ordinaire, affinité s'entend de deux choses ou de deux personnes qui ont des ressemblances, en chimie au contraire l'affinité s'exerce surtout entre les corps de propriétés et de formes dissemblables, tels que les acides et les bases.

A côté de l'affinité, se trouve la force dissolvante, qui fait qu'un liquide dissout des quantités plus ou moins grandes des corps en contact avec lui : il n'y a pas de réaction chimique proprement dite dans ce phénomène, car on peut généralement par évaporation retrouver le corps dissous. Il faut une similitude de constitution entre le corps dissolvant et le corps dissous, ainsi l'eau dissout les corps très-oxygénés et est sans action sur les huiles et résines qui ne renferment que peu ou point d'oxygène : au contraire, l'alcool et surtout l'éther, peu riches en oxygène, dissolvent parfaitement les huiles et les résines.

Lorsqu'on a détruit la cohésion d'une substance, soit par fusion, soit par dissolution, on peut souvent la faire réapparaître sous des formes géométriques, spéciales pour chaque substance et qu'on appelle formes cristallines.

Tout le monde sait que les substances minérales présentent généralement, non pas une cassure unie et régulière, mais une cassure dite cristalline : en l'examinant soit à l'œil nu, soit à la loupe, on reconnaît que la masse est formée de particules régulières, ou cristaux, enchevêtrées les unes dans les autres. Ces formes élémentaires peuvent, dans certaines circonstances, s'obtenir nettes et amplifiées, et il y a pour cela trois méthodes :

1° *Par fusion.* — Lorsqu'on a une substance facilement fusible telle que le soufre, le bismuth, le plomb, on la fait fondre, puis on laisse le liquide se refroidir lentement. A la surface se forme une couche solide, le travail moléculaire se produit tranquillement à l'intérieur surtout si le refroidissement est lent; au bout de quelque temps, on perce la croûte supérieure, et par le trou formé on fait écouler la partie restée liquide, puis en enlevant la croûte on trouve l'intérieur tapissé de cristaux ou solides réguliers. C'est ainsi que le bismuth donne des cubes pouvant atteindre de fort belles dimensions.

2° *Par sublimation.* — Dans un vase à long col, on place une substance facilement volatile, l'arsenic ou le sel ammoniac par exemple, et l'on chauffe. Le corps se volatilise puis se condense, dans les parties supérieures du col de l'appareil, en cristaux que l'on peut facilement recueillir en brisant le vase.

3° *Par dissolution.* — On dissout dans l'eau un corps très-soluble, tel que le vitriol bleu (sulfate de cuivre) ou l'alun : généralement la solubilité d'un corps augmente avec la température, de sorte qu'en refroidissant le mélange, la quantité dissoute ne pourra être retenue, et une partie retournera à l'état solide : si le refroidissement est lent, il se formera de superbes cristaux réguliers. On sait aussi que la quantité dissoute est proportionnelle au volume de liquide employé, si donc on arrive à réduire le volume de liquide, par l'évaporation par exemple, il se déposera des cristaux au sein de la liqueur, c'est de la sorte qu'on extrait des eaux de la mer le chlorure de sodium ou sel marin.

Les formes cristallines semblent au premier abord excessivement variées; on peut cependant tracer à l'intérieur d'un cristal des axes principaux, et cela de six manières différentes, ce qui donne six systèmes cristallins :

1° Trois axes rectangulaires égaux, système cubique;

2° Trois axes rectangulaires, dont deux égaux, système du prisme droit à base carrée;

3° Trois axes rectangulaires inégaux, système du prisme droit à base rectangle;

4° Trois axes égaux dans un même plan, et un quatrième axe perpendiculaire au plan des trois autres, système du prisme hexagonal régulier ou système rhomboédrique;

5° Deux axes inégaux perpendiculaires, et un troisième oblique sur le plan des deux autres, système du prisme oblique à base rectangle;

6° Trois axes obliques inégaux, système du prisme oblique à base de parallélogramme.

De ces six formes-types se déduisent une infinité d'autres formes; mais les modifications sont toujours régulières. Si un angle de la forme-type est tronqué sur le cristal, tous les angles similaires sont également tronqués; si une arête est remplacée par une face plane ou pan coupé, toutes les arêtes similaires présentent des pans coupés égaux au premier. Une modification, effectuée sur l'une des parties d'un cristal, doit affecter de la même manière toutes les parties identiques du cristal; c'est en partant de ce principe, qu'il est facile, avec un modèle en bois ou en plâtre, de déduire du cube toutes les formes cristallines qui composent le système cubique.

Chaque substance affecte, en général, une seule forme cristalline, qui permet de la reconnaître : c'est de ce principe que l'on part en minéralogie pour reconnaître la constitution d'un corps. Certaines substances sont isomorphes (de forme pareille), et se mélangent dans leurs cristaux : cela n'arrive que lorsque les substances ont une constitution chimique analogue, par exemple, les sulfates de cuivre et de fer. Les divers aluns sont isomorphes, et l'alumine peut s'y trouver remplacée par les sesquioxydes de chrome et de fer.

Le dimorphisme (double forme) est la propriété que présentent certaines substances de cristalliser sous deux formes différentes, suivant les conditions où elles sont placées; ainsi le soufre, fondu et refroidi lentement, cristallise en prismes allongés obliques à base rhombe, appartenant au cinquième système; au contraire, dissous dans le sulfure de carbone, il cristallise en octaèdres droits à base rhombe du troisième système.

Lois des proportions multiples. — Équivalents. — Les corps ne se combinent pas dans des proportions quelconques, ils se combinent en proportions définies. Ainsi, introduisons dans un vase un poids (p) de gaz hydrogène, et un poids (p') de gaz oxygène, et faisons passer une étincelle électrique dans le mélange, les deux gaz se combinent pour donner de l'eau qui se liquéfie instantanément : le vide se fait donc dans le vase, et si ce vase est un tube ouvert par en bas et plongeant dans une cuve à eau, l'eau va monter dans le tube pour remplir le vide. On constate que si le rapport $\frac{p}{p'} = \frac{1}{8}$, le vide est complet, et le tube est tout entier rempli par l'eau : si $\frac{p}{p'} > \frac{1}{8}$, il reste un excès d'hydrogène; dans le cas contraire, il reste un excès d'oxygène. La relation qui existe entre les volumes combinés est encore plus simple : deux volumes d'hydrogène se combinent à un volume d'oxygène pour donner de l'eau; si cette proportion n'est pas observée, il y a un excès de l'un ou de l'autre gaz.

Le fait précédent n'est pas une exception : on reconnaît encore que pour oxyder

un poids donné (p) de métal, il faut un poids p' d'oxygène tel, que $\frac{p'}{p}$ soit constant. Ainsi 8 grammes d'oxygène oxydent 32gr,75 de zinc, 59 grammes d'étain, 100 grammes de mercure, 108 grammes d'argent, et les poids combinés sont toujours dans le rapport de ces nombres.

Nous pouvons donc établir les lois suivantes :

1° Le poids d'un composé est égal à la somme des poids des composants;

2° Un corps est toujours formé des mêmes éléments unis dans les mêmes proportions (loi des proportions définies);

3° Les volumes de deux gaz ou vapeurs qui se combinent sont entre eux dans des rapports simples, si on les mesure à la même température et à la même pression. Ainsi, 2 volumes d'hydrogène se combinent à 1 volume d'oxygène; 1 volume de chlore se combine à 1 volume d'hydrogène; 1 volume d'acide chlorhydrique, à 1 volume d'ammoniaque; 1 volume de soufre, à 2 volumes d'hydrogène. Cette loi est connue sous le nom de loi de Gay-Lussac; elle se complète par la suivante :

4° Le volume d'un gaz composé ou de la vapeur d'un gaz composé est toujours dans un rapport simple avec les volumes de gaz ou de vapeurs constituants; ainsi, 2 volumes d'hydrogène et 1 volume d'oxygène donnent 2 volumes de vapeur d'eau, et il y a condensation d'un tiers; 1 volume d'hydrogène et 1 volume de chlore donnent 2 volumes d'acide chlorhydrique.

Il résulte de ce qui précède qu'un corps A se combine avec deux corps B et C dans des proportions constantes; soit p le poids de A, p' et p'' les poids de B et C; prenons le même poids p d'un autre corps A', il se combinera avec des poids p_1' et p_1'' de B et C, et l'on remarque que les rapports $\frac{p'}{p''}$, $\frac{p_1'}{p_1''}$ sont les mêmes. Si, de plus, on combine ensemble les deux corps B et C, on est tout étonné de voir que les poids de ces corps qui entrent dans la combinaison sont précisément dans le rapport $\frac{p'}{p''}$, $\frac{p_1'}{p_1''}$. Ainsi, avec 8 grammes d'oxygène se combinent 1 gramme d'hydrogène pour donner de l'eau, 28 grammes de fer pour former de l'oxyde de fer; les mêmes quantités, 1 gramme d'hydrogène et 28 grammes de fer se combinent à 16 grammes de soufre pour donner de l'acide sulfhydrique et du sulfure de fer. Donc, 1 gramme d'hydrogène et 28 grammes de fer peuvent se substituer, et, par suite, sont équivalents vis-à-vis de 8 grammes d'oxygène et de 16 grammes de soufre; si l'on cherche combien il faut de soufre pour saturer 8 grammes d'oxygène, on trouve précisément 16 grammes. Les quantités 8 grammes d'oxygène et 16 grammes de soufre sont donc équivalentes entre elles.

Dans une dissolution de nitrate d'argent, plongez une lame de cuivre, elle se recouvrira d'une poudre noire qui est de l'argent pulvérulent, et une partie du cuivre se sera dissoute dans la liqueur, qui devient bleuâtre : si l'on recueille la poudre noire et qu'on la pèse, qu'on pèse aussi la diminution de poids de cuivre, on trouve qu'un poids p de cuivre a expulsé p' d'argent, et ces poids p et p' sont comme 32 est à 108 : 32 grammes de cuivre sont donc l'équivalent de 108 grammes d'argent. De même, pour déplacer 32 grammes de cuivre, il faut 28 grammes de fer, 33 grammes de zinc et 104 grammes de plomb. Nous avons vu plus haut que 28 grammes de fer saturaient 8 grammes d'oxygène, et 16 grammes de soufre; les mêmes quantités d'oxygène et de soufre sont saturées par 32 grammes de cuivre, 108 grammes d'argent, etc...

Tous ces nombres sont donc équivalents; c'est d'après cela qu'on a donné le nom d'équivalents chimiques à l'expression numérique des rapports qui existent entre les quantités pondérables des divers corps susceptibles d'entrer dans les combinaisons chimiques, et de s'y substituer les unes aux autres pour former des composés chimiquement analogues.

Pour établir ces rapports, on prend l'un des corps simples pour point de départ, et l'on représente par l'unité le poids de ce corps que saturent les autres corps simples; c'est en prenant l'hydrogène pour point de départ, que l'on dresse le tableau suivant :

TABLEAU DES ÉQUIVALENTS DES CORPS SIMPLES RAPPORTÉS A L'HYDROGÈNE = 1

MÉTALLOÏDES.		
Hydrogène	H.	1 00
Oxygène	O.	8 00
Soufre	S.	16 00
Sélénium	Se.	64 50
Tellure	Te.	39 75
Fluor	Fl.	19 00
Chlore	Cl.	35 50
Brome	Br.	80 00
Iode	I.	127 00
Azote	Az.	14 00
Phosphore	Ph.	31 00
Arsenic	As.	75 00
Antimoine	Sb.	122 00
Carbone	C.	6 00
Bore	Bo.	10 89
Silicium	Si.	21 00
Zirconium	Zr.	33 58
MÉTAUX.		
Potassium	K.	39 14
Sodium	Na.	23 00
Lithium	Li.	6 53
Baryum	Ba.	68 50
Strontium	Sr.	43 75
Calcium	Ca.	20 00
Glucinium	Gl.	6 96
Aluminium	Al.	13 67
Magnésium	Mg.	12 00
Thorium	Th.	59 50
Yttrium	Y.	32 18
Cérium	Ce.	47 26
Lanthane	La.	48 00
Didyme	Di	» »
Manganèse	Mn.	27 50
Uranium	U.	60 00
Pelopium	».	» »
Niobium	».	» »
Erbium	».	» »
Terbium	».	» »
Fer	Fe.	28 00
Nickel	Ni.	29 50
Cobalt	Co.	29 50
Zinc	Zn.	32 75
Cadmium	Cd.	56 00
Chrome	Cr.	26 28
Vanadium	Vn.	68 46
Tungstène	W.	92 00
Molybdène	Mo.	48 00
Osmium	Os.	99 50
Tantale	Ta.	92 29
Titane	Ti.	25 10
Étain	Sn.	59 00
Bismuth	Bi.	106 43
Plomb	Pb.	103 50
Cuivre	Cu.	31 75
Mercure	Hg.	100 00
Argent	Ag.	108 00
Rhodium	Rh.	52 16
Iridium	Ir.	98 57
Palladium	Pd.	53 23
Ruthénium	Rh.	52 16
Platine	Pt.	98 58
Or	Au.	98 18

Nous verrons plus tard de quelle utilité peuvent être dans les calculs pratiques les équivalents ainsi déterminés.

Dans le tableau ci-joint, on a placé en face de chaque corps le signe par lequel on le représente dans les formules chimiques; il faut se familiariser avec ces symboles. Dans les calculs, on donne à ces symboles la valeur numérique de l'équivalent du corps qu'ils représentent.

Nomenclature chimique. — Les alchimistes eux-mêmes avaient senti la nécessité d'une classification, mais ils procédaient sans ordre et sans méthode. Guyton de Morveau et Lavoisier inventèrent la nomenclature encore en usage aujourd'hui, dans laquelle ils s'efforcèrent non-seulement de donner un nom

aux composés, mais de montrer par ce nom même quels sont les éléments qui les composent. Leur classification est basée sur la théorie du dualisme : « Un corps quelconque se forme par la combinaison, par la juxtaposition de deux autres corps simples ou composés; il y a là comme un antagonisme entre les deux éléments, et le composé peut se représenter par la juxtaposition des symboles des deux éléments. »

Acides, bases, sels. — La physique nous a montré que tout composé binaire se décompose par le courant de la pile; l'un des éléments se rend au pôle positif, l'autre au pôle négatif; et, comme les électricités de nom contraire s'attirent, on appelle élément électro-négatif celui qui se rend au pôle positif, et élément électro-positif celui qui se rend au pôle négatif.

Pour désigner le composé binaire, on nomme le premier l'élément électro-négatif, qu'on fait suivre de la dénomination (*ure*) et du nom de l'autre élément : le composé de chlore et de fer est du chlorure de fer; du soufre et du zinc est du sulfure de zinc; de l'iode et du sodium est de l'iodure de sodium, etc... Dans l'écriture, on juxtapose les deux symboles, en écrivant le premier l'élément électro-positif; ainsi le sulfure de potassium s'écrit KS; le chlorure de sodium, NaCl; l'iodure de sodium, NaI.

Dans tout cela on avait mis de côté les composés oxygénés, auxquels on reconnaissait des propriétés spéciales. L'oxygène donne deux grandes classes de composés : les acides et les oxydes. Les acides possèdent une saveur plus ou moins aigre, comme leur nom l'indique; ils ont la propriété de rougir la teinture bleue de tournesol, et de former des sels avec les bases. Les oxydes se divisent en deux grandes classes : 1° les bases, corps à saveur urineuse, qui forment des sels avec les acides, et qui ramènent au bleu la teinture de tournesol, rougie par un acide; 2° les corps neutres ou indifférents, auxquels s'applique particulièrement le nom d'oxydes, et qui peuvent quelquefois jouer le rôle d'acides en présence des bases puissantes, ou le rôle de bases vis-à-vis des acides énergiques.

Nomenclature des acides. — Un corps, tel que le soufre, forme avec l'oxygène plusieurs acides; on désigne le plus oxygéné par la terminaison *ique*, et le moins oxygéné par la terminaison *eux;* on a de la sorte l'acide sulfurique et l'acide sulfureux. Quelquefois, entre les deux, se place un autre acide ayant une proportion intermédiaire d'oxygène, on le désigne par la terminaison (*ique*) et l'on fait précéder le nom de la particule *hypo* (au-dessous), c'est ainsi qu'on a l'acide hyposulfurique intermédiaire entre l'acide sulfureux et l'acide sulfurique.

Il est arrivé aussi que, postérieurement à la découverte de l'acide en *eux*, on a découvert un acide moins oxygéné; on l'a désigné par le symbole *hypo... eux*, par exemple, l'acide hyposulfureux.

De même, on a préparé certains acides plus oxygénés que les acides en *ique* déjà connus et pour ne pas changer des dénominations en usage, on les a désignés par *hyper... ique;* ainsi l'on a l'acide hyperchlorique (plus oxygéné que l'acide chlorique, *hyper* veut dire au-dessus.)

Nomenclature des oxydes. — Les oxydes et les bases sont désignés de la même manière sous le nom général d'oxydes. Un métal tel que le fer forme avec l'oxygène plusieurs combinaisons dans lesquelles un équivalent de fer est uni à 1, 1 $\frac{1}{2}$, 2 équivalents d'oxygène; les corps ainsi formés ont pour symbole FeO, Fe^2O^3, FeO^2, et on les désigne par les noms de protoxyde de fer, sesquioxyde de fer, bioxyde de fer. La potasse est un protoxyde de potassium, la baryte un protoxyde de baryum. On comprend de même ce que c'est que l'oxyde de carbone.

Quand il y a plusieurs oxydes, on donne souvent au plus oxygéné le nom de peroxyde.

Nomenclature des sels. — Les sels engendrés par des acides en *eux* prennent la terminaison *ite*, et les sels engendrés par des acides en *ique* prennent la terminaison *ate ;* ainsi le sel formé par l'acide sulfureux et le protoxyde de fer s'appelle sulfite de protoxyde de fer, et celui que forme l'acide sulfurique s'appelle sulfate de protoxyde de fer. On conçoit de même ce que veut dire hyposulfite de soude, hyposulfate de soude.

Quelquefois une même base, la potasse par exemple, peut s'unir à 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4 équivalents d'acide, on a par exemple :

Un sulfate, un bisulfate, un trisulfate de potasse,
Un oxalate, un bioxalate, un quadroxalate de potasse.

D'autres fois, c'est l'acide qui prend plusieurs équivalents de base, on a alors des sels basiques ou sous-sels ; ainsi le sulfate tribasique de fer contient trois équivalents de base pour un d'acide, tandis que le sulfate de fer contient un de base et un d'acide.

Par rapport aux bases puissantes, l'eau joue le rôle d'acide, et on a alors des composés tels que l'hydrate de potasse, l'hydrate de soude, etc...

Par rapport aux acides énergiques, l'eau joue le rôle de base, et on connaît par exemple l'acide phosphorique monohydraté, bihydraté, trihydraté.

Nous avons vu les composés binaires à terminaison *ure*, tels que le sulfure de fer ; le soufre peut être uni au fer dans des proportions variables d'où résulte un protosulfure, un sesquisulfure, un bisulfure de fer.

L'hydrogène donne avec d'autres corps, le chlore, le soufre, l'iode, le brome des acides qu'on appelle chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique... Si le composé de l'hydrogène avec un corps simple n'est pas acide, on l'appelle hydrure, par exemple hydrure de phosphore, et mieux hydrogène phosphoré.

Les métaux se mélangent en proportions variables, et les mélanges obtenus sont des alliages, ou des amalgames, lorsque le mercure entre dans la combinaison.

La nomenclature précédente est commode et on la conservera probablement longtemps dans la pratique, mais elle est tout à fait artificielle en ce sens qu'elle a pour base le dualisme. Il est parfaitement reconnu aujourd'hui que les corps ne se forment point par la juxtaposition de deux éléments, mais par la substitution d'une ou de plusieurs molécules, simples ou complexes, à un nombre égal d'autres molécules similaires. Nous aurons lieu d'éclaircir ce fait en chimie organique. Il était bon d'en parler afin de prémunir le lecteur contre la nomenclature en usage. L'oxygène n'est pas seul à engendrer des corps jouant le rôle d'acides et de bases ; les sulfures, chlorures, etc., peuvent se combiner entre eux et former de véritables sels : on voit donc que la classification de Lavoisier est aujourd'hui purement artificielle.

Distinction des corps simples en métaux et métalloïdes. — Le tableau des corps simples que nous avons donné plus haut les divise en deux grandes classes : métaux et métalloïdes.

1° Les métaux sont solides à la température ordinaire, sauf le mercure ; ils sont généralement de grande densité ; ils possèdent l'éclat bien connu sous le nom d'éclat métallique. Bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité, ils se distinguent par leur ténacité et leur malléabilité, et ne fondent qu'à de hautes températures.

2° Les métalloïdes sont généralement de faible densité ; et même l'oxygène, l'hydrogène, le chlore, l'azote sont gazeux. Mauvais conducteurs de la chaleur et de l'électricité, ils ont, en général, un aspect terne, tout différent de l'éclat métallique. Lorsqu'on décompose par la pile une combinaison formée d'un métal et d'un métalloïde, celui-ci se rend au pôle positif, celui-là au pôle négatif : le métalloïde est donc l'élément électro-négatif et le métal l'élément électro-positif.

Cette division n'a rien d'absolu, car plusieurs métalloïdes, tels que l'arsenic, ont des propriétés métalliques ; l'hydrogène a des propriétés chimiques tout à fait analogues à celles des métaux proprement dits.

La décomposition du chlorate de potasse s'opère avec l'appareil représenté plus haut pour la réduction de l'oxyde de mercure.

Autres modes de préparation de l'oxygène :

1° L'acide sulfurique ordinaire (So^3,HO) décompose le bioxyde de manganèse MnO^2 et le réduit à l'état de protoxyde :

$$MnO^2 + So^3,Ho = MnO,So^3 + HO + O.$$

2° Sur de la baryte (BaO), on fait passer un courant d'air, à une température modérée, et la baryte absorbe l'oxygène de l'air pour se transformer en bioxyde de baryum (BaO^2), lequel porté à une température plus élevée se décompose à son tour en baryte BaO et en oxygène qu'on peut recueillir. Avec une quantité limitée de baryte, on peut donc par des opérations successives préparer une quantité illimitée d'oxygène. On espérait par ce moyen arriver à se procurer de l'oxygène pour les besoins de l'industrie ; mais on reconnut qu'après plusieurs opérations, la baryte devenait inactive et n'absorbait plus l'oxygène.

Propriétés et caractères distinctifs de l'oxygène. — L'oxygène est le principe actif de l'air. C'est lui qui entretient la combustion. Les corps incandescents plongés dans l'oxygène pur y prennent un vif éclat, et quelquefois disparaissent par la combustion.

Fig. 252.

Dans un flacon plein d'oxygène placez un morceau de charbon allumé en un point, il s'enflamme rapidement et disparaît en formant de l'acide carbonique qui remplace l'oxygène. Au bouchon du flacon fixez un fil de fer tordu en spirale et terminé par un fragment d'amadou qu'on enflamme : le fil de fer fond et s'oxyde, et les globules de fer qui se détachent briseraient le vase si l'on n'avait eu soin d'y introduire un peu d'eau. Le diamant, qui est du charbon cristallisé brûle de même dans l'oxygène. Le phosphore, le soufre y brûlent avec une lumière éclatante.

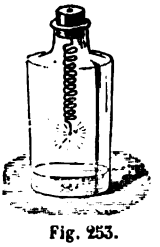


Fig. 253.

Dans l'air, l'action de l'oxygène est moins active parce qu'il y est dilué et comme dissous dans un gaz inactif, l'azote.

L'oxygène n'est pas apte à produire seulement des combustions rapides et lumineuses ; le plus souvent il produit des combustions lentes et obscures, c'est-à-dire des oxydations, c'est ainsi qu'à l'air le fer se rouille, le cuivre se vert-de-grise, etc... Ces phénomènes ont même résultat final que la combustion vulgaire ; ce résultat est l'oxydation du corps considéré.

La respiration est une véritable combustion : l'oxygène de l'air se trouve dans le poumon en présence du sang noir chargé de principes carburés qui donnent de l'acide carbonique. L'oxygène est indispensable à la respiration : un animal meurt rapidement dans le vide, aussi bien que dans tout milieu gazeux où l'oxygène ne se trouve pas en quantité suffisante. L'action de l'oxygène de l'air est mitigée par la présence de l'azote : dans un espace plein d'oxygène pur, tout être vivant, un oiseau, par exemple, éprouve comme une accélération de la vie, puis il tombe épuisé.

Nous voyons, d'après ce qui précède, combien il faut étendre le sens du mot combustion : il signifie simplement combinaison de deux ou plusieurs corps, car toute combinaison s'accompagne d'un développement de chaleur et, si la réaction est énergique, d'un développement de lumière et d'électricité. Les combinaisons formées par l'oxygène sont les combustions que l'on rencontre le plus souvent

dans la nature et dans l'industrie humaine. Sous l'influence de l'électricité l'oxygène se modifie et forme l'ozone, qui possède les propriétés de l'oxygène plus énergiquement développées. Sa constitution est encore peu connue.

Usages industriels. — Les usages industriels de l'oxygène prendraient un développement énorme si on pouvait préparer ce gaz à peu de frais : on comprend en effet quels services il rendrait aux établissements métallurgiques de toutes espèces. Une application récente en a été faite au gaz d'éclairage : nous aurons lieu d'y revenir.

HYDROGÈNE

L'hydrogène (qui engendre l'eau) est un gaz incolore et inodore découvert en 1777 par Cavendish. Il est de tous les gaz le plus léger, sa densité par rapport à l'air est 0,069 ; il est donc 14 fois 1/2 moins lourd que l'air. A 0° et sous la pression 0,76 un litre d'hydrogène pèse $0^{gr},0896$. Il a jusqu'à présent résisté à tous les moyens connus de liquéfaction.

Préparation. — L'hydrogène n'existe pas à l'état libre : pour le préparer, le moyen le plus simple est de l'enlever à l'eau qui est un protoxyde d'hydrogène (HO).

1° Le zinc en présence de l'eau et de l'acide sulfurique s'oxyde, forme un sulfate et de l'hydrogène se dégage comme le montre l'équation :

$$Zn + So^3,HO = ZnO,So^3 + H.$$

Dans un flacon de verre, on met de la grenaille de zinc et de l'eau, puis on verse peu à peu de l'acide sulfurique ordinaire au moyen du tube à entonnoir que

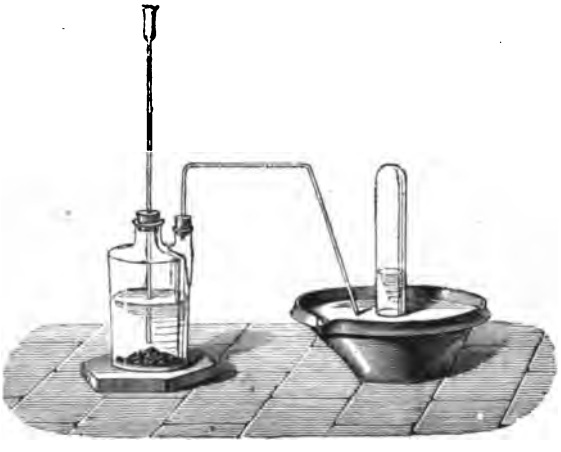


Fig. 254.

représente la figure 254 : le dégagement se fait tumultueusement et il faut opérer avec précaution. Le gaz est recueilli dans une éprouvette pleine d'eau. En substituant les équivalents aux symboles de l'équation précédente, on reconnaît qu'un kilogramme de zinc fournit 338 litres de gaz hydrogène.

2° Le fer porté au rouge décompose la vapeur d'eau, fixe l'oxygène et laisse l'hydrogène libre.

Dans la cornue est de l'eau que l'on vaporise : la vapeur passe dans un tube en grès placé dans un fourneau et rempli de fils de fer fins ; l'hydrogène est recueilli dans l'éprouvette. Il est évident que, pour avoir le gaz pur, il faut

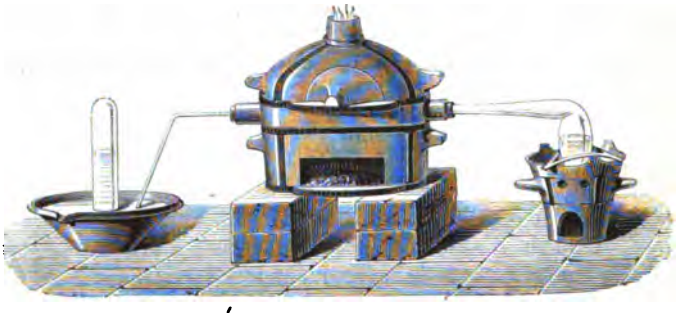


Fig. 255.

laisser d'abord le dégagement s'opérer pendant un certain temps afin que tout l'air soit expulsé ; la même remarque s'applique au premier mode de préparation. La précaution n'est pas inutile, car l'hydrogène forme avec l'air un mélange qui détone à l'approche d'un corps enflammé : l'éprouvette peut se briser et blesser l'opérateur.

Propriétés et caractères distinctifs. — L'hydrogène est le plus subtil des gaz ; il traverse facilement les parois de la plupart des vases où on le renferme : un jet d'hydrogène dirigé sur une feuille de papier, la traverse presque intégralement. Tous les gaz possèdent cette propriété de traverser les membranes, qu'on appelle endosmose, mais elle est d'autant plus énergique que la densité est moindre.

L'hydrogène est inflammable, et brûle à l'air avec une flamme bleuâtre très-pâle : il est facile de le vérifier en approchant une allumette d'une éprouvette pleine de gaz hydrogène (il faut avoir soin de tenir l'ouverture de l'éprouvette vers le sol, sans quoi le gaz plus léger que l'air s'échapperait).

La flamme de l'hydrogène est pâle parce qu'elle ne renferme point de particules solides en suspension ; une flamme ne devient brillante que si elle renferme des particules solides qui sont portées à l'incandescence. Aussi voit-on la lampe à hydrogène prendre un éclat remarquable, si on dirige le jet de flamme sur un morceau de craie par exemple (lumière de Drummond) ; les bougies et lampes ordinaires ont une flamme éclatante, parce qu'il y a combustion incomplète ; des particules de charbon qu'il est facile de recueillir sur un morceau de porcelaine ne sont pas brûlées et deviennent incandescentes.

L'hydrogène est combustible, mais il n'entretient pas la combustion ; une mèche allumée plongée dans une éprouvette d'hydrogène commence par enflammer le gaz, puis s'éteint lorsqu'elle a pénétré dans la masse.

N'étant pas comburant, l'hydrogène n'est pas respirable : les animaux plongés dans ce gaz sont asphyxiés ; toutefois il n'est pas délétère, c'est-à-dire qu'il ne désorganise pas les appareils respiratoires.

En brûlant, l'hydrogène donne de l'eau qu'il est facile de recueillir : mélangé à l'oxygène, dans la proportion de deux volumes d'hydrogène pour un d'oxygène, il constitue un mélange détonant ; les deux gaz se combinent instantanément pour former de l'eau qui se trouve condensée en un instant ; il en résulte un

vide brusque que vient remplir l'air extérieur, d'où un choc et une explosion.

Usages de l'hydrogène. — L'hydrogène sert à préparer en petite quantité des métaux parfaitement purs: pour cela, on le fait passer au rouge sur des oxydes métalliques, de la vapeur d'eau se dégage et le métal reste à l'état pulvérulent.

Nous avons vu en physique que la combustion de l'hydrogène donnait le plus grand nombre de calories, c'est-à-dire la plus grosse somme de chaleur. C'est sur ce principe qu'est fondé le chalumeau à gaz oxygène et hydrogène: de deux

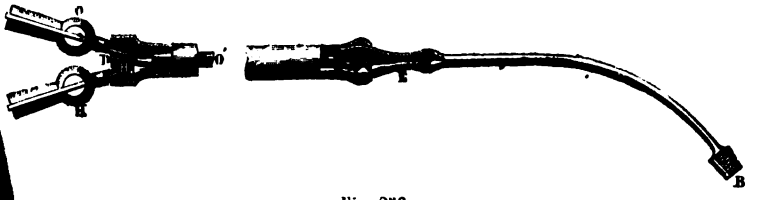


Fig. 256.

réservoirs arrivent par les tuyaux O et H de l'oxygène et de l'hydrogène, les deux gaz se mélangent dans un tube de caoutchouc prolongé par un tube de cuivre B à l'extremité duquel on enflamme le mélange. On règle les robinets O et H de façon qu'il arrive deux fois plus d'hydrogène que d'oxygène. Le jet de flamme donne une température très-élevée qui permet de souder sur eux-mêmes les métaux les plus réfractaires, de fondre le platine, de volatiliser l'argent.

Azote. — L'azote est un gaz incolore, inodore, insipide, non liquéfié jusqu'à présent. Sa densité est 0,972 ; un litre d'azote pèse donc, 1^{gr},257. Un mètre cube d'eau dissout 25 litres d'azote. Il se distingue, surtout, par des caractères négatifs, c'est le corps neutre par excellence : ses composés sont généralement instables. Il forme avec l'oxygène l'acide azotique, avec l'hydrogène l'ammoniaque. Il existe en grande abondance dans la nature; l'air en renferme à peu près les $\frac{4}{5}$ de son volume; c'est un gaz inactif, qui éteint les corps enflammés, qui est impropre à la respiration sans toutefois être délétère.

Préparation. — Pour le préparer, il suffit d'enlever l'oxygène de l'air :

1° Placez sous une cloche un animal que vous y laisserez séjourner jusqu'à ce qu'il soit [as]phyxié. Il aura enlevé presque tout l'oxygène, mais, en revanche, aura dégagé de l'acide carbonique que l'on pourra absorber par un lait de chaux (liquide laiteux renfermant de la chaux en suspension); l'azote reste à peu près pur sous la cloche.

2° Sous une cloche placée sur la cuve à eau est placé un flotteur de Liége portant une coupe avec quelques grammes de phosphore que l'on enflamme. Le phosphore absorbe l'oxygène de l'air confiné pour se transformer en acide phosphorique (PHO^5) qui se dissout dans l'eau. L'azote reste dans la cloche.

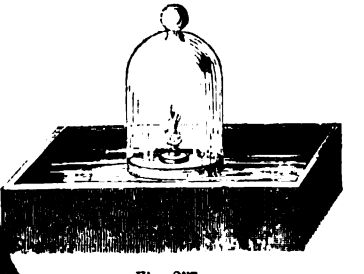


Fig. 257.

3° Plus souvent, on se sert de la propriété qu'ont les métaux d'absorber l'oxygène de l'air à une température élevée pour former des oxydes. C'est ordinairement le cuivre qu'on emploie. Un mince filet d'eau s'échappe d'un flacon pour tomber dans un entonnoir et se rendre dans un autre flacon primitivement plein

d'air. Cet air est chassé, et vient passer dans une tube en verre rempli de feuilles de cuivre et chauffé au rouge (ce tube de verre est entouré d'une feuille de clinquant afin de résister à la chaleur). Le cuivre absorbe l'oxygène et l'azote est recueilli dans une éprouvette pleine d'eau.

L'air ordinaire est impur et renferme de l'acide carbonique ; pour le purifier,

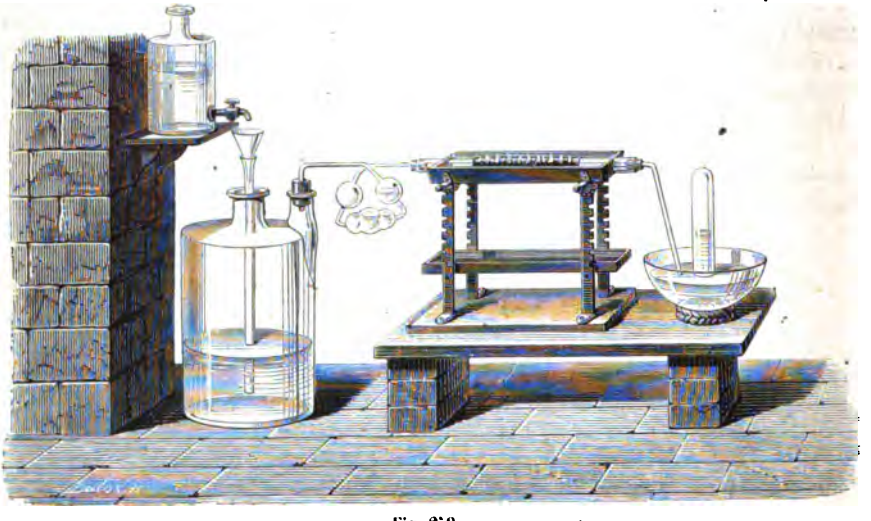


Fig. 258.

on le force à passer dans l'appareil à boules, dit appareil de Liebig, que représente la figure ; les boules sont remplies d'une dissolution faible de potasse ; l'air est forcé de passer lentement à travers ces boules, et y laisse son acide carbonique qui forme du carbonate de potasse.

Soufre. — Le soufre, à la température ordinaire, est un corps solide, d'un jaune citron, inodore, insipide, friable et facile à pulvériser, mauvais conducteur de la chaleur, puisqu'on peut tenir à la main un bâton de soufre enflammé à l'autre bout, mauvais conducteur de l'électricité, puisqu'il s'électrise par le frottement. Il pèse environ deux fois plus que l'eau. On l'obtient en cristaux, soit par fusion, soit par dissolution : 1° on fait fondre une masse de soufre, puis on la laisse refroidir, il se forme à la surface une croûte que l'on perce au fer rouge, on fait écouler le liquide intérieur ; on enlève la croûte, et on trouve le vase tapissé de cristaux ou longues aiguilles flexibles et transparentes, appartenant au cinquième système cristallin ; 2° le soufre est soluble dans le sulfure de carbone (CS^2) ; laissez la dissolution s'évaporer lentement et vous obtiendrez de beaux cristaux octaédriques du quatrième système. Le soufre est donc un corps dimorphe : la dernière forme s'obtient quand l'arrangement des molécules se fait à froid, la première quand l'arrangement se fait à chaud.

Le soufre fond à 114° ; si on le chauffe davantage, la liqueur au lieu de rester fluide devient visqueuse, et l'on peut retourner le vase sans que rien s'en échappe ; le soufre bout et s'évaporise à 440°.

La densité de la vapeur de soufre n'est constante que si on la prend assez loin du point de vaporisation : vers 1000°, elle est constante, la vapeur est alors un véritable gaz dont la densité est 2,218.

Le soufre se modifie par la trempe : faites couler du soufre fondu dans de l'eau

froide, vous obtiendrez une masse flexible et élastique, analogue au caoutchouc.

Le soufre est insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'alcool et l'éther, très-soluble dans les matières grasses et bitumineuses, et surtout dans le sulfure de carbone.

Le soufre brûle à l'air, en donnant une flamme bleuâtre d'acide sulfureux (SO^2). Il a un rôle analogue à celui de l'oxygène, et tous leurs composés ont de grandes ressemblances ; les sulfures métalliques sont analogues aux oxydes.

Préparation. — Le soufre se trouve à l'état naturel dans les terrains volcaniques, mélangé à beaucoup de terre. La plus grande partie vient de Sicile. Voici comme on le purifie à Marseille :

Une marmite M, chauffée par les gaz de la combustion renferme le soufre fondu, qui coule de là dans une cornue en fonte C où s'opère la distillation. La vapeur se rend dans une grande chambre : si la distillation marche lentement,

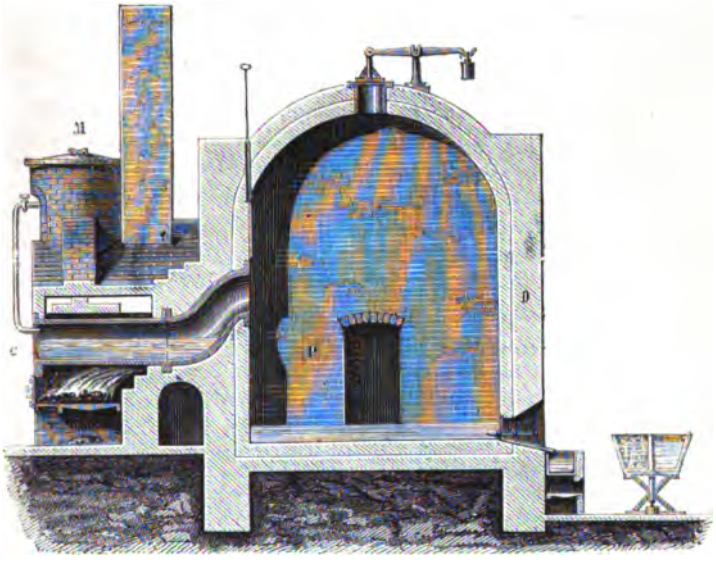


Fig. 259.

le soufre se condense et s'attache aux prois de la chambre sous la forme de fleur de soufre ; si la distillation marche vite, le soufre se liquéfie et forme une couche liquide sur la sole de la chambre. Une bonde permet de le faire écouler dans des moules plongés dans des auges d'eau froide ; ces moules sont cylindriques et donnent le soufre en canons. Si l'air dilaté vient à donner une pression trop forte dans la chambre, la soupape supérieure se soulève.

Si le soufre naturel venait à manquer, on le trouverait dans une masse de minéraux ; tous les sulfures métalliques et tous les sulfates, tels que le sulfate de chaux. Le sulfure de fer (FeS^2) se décompose par la chaleur, et l'on a la réaction :

$$3FeS^2 = Fe^3S^4 + S^2.$$

Usages industriels. — Il entre dans la composition des allumettes, de la poudre ; est employé dans la thérapeutique pour les maladies de la peau, et donne des composés fort utiles, tels que l'acide sulfureux et l'acide sulfurique.

Chlore. — Découvert par Scheele en 1774, le chlore est un gaz verdâtre (de *chlóros*, jaune verdâtre). Densité 2,44 ; donc un litre de chlore pèse 3gr,17. Sous une pression de cinq atmosphères, à la température ordinaire, le chlore se liquéfie et sa densité est alors par rapport à l'eau 1,33.

Le chlore est délétère et produit rapidement des crachements de sang. Il n'entretient pas la combustion, parce qu'il ne se combine pas avec le carbone de la matière combustible ; toutefois, comme il se combine avec l'hydrogène, la flamme persiste quelque temps avant de s'éteindre, mais elle est très-fumeuse.

Un litre d'eau dissout trois litres de chlore ; la dissolution a une couleur verte assez intense ; elle se conserve dans des flacons en verre noir qui arrête la lumière solaire. Sous l'influence de cette lumière, le chlore décompose l'eau, et donne de l'acide chlorhydrique HCl avec de l'oxygène ; cet oxygène à l'état naissant, c'est-à-dire à peine produit, se trouve en présence du chlore et donne avec lui des acides chlorique ClO^5 et perchlorique (ClO^7) (à l'état ordinaire, le chlore et l'oxygène ne se combinent pas). La dissolution de chlore devient au bout de quelque temps incolore.

Le chlore a pour l'hydrogène une affinité puissante. Si l'on mélange ces deux gaz et qu'on en approche un corps enflammé, il se produit une détonation violente. Si on porte brusquement à la lumière solaire un ballon rempli dans l'obscurité de volumes égaux d'hydrogène et de chlore, le ballon vole en éclats et il se produit une forte détonation ; les deux gaz se sont intégralement combinés en donnant de l'acide chlorhydrique.

Le phosphore s'enflamme quand un courant de chlore vient le frapper ; les métaux échauffés, tels que l'étain, le fer, le cuivre, le mercure brûlent dans le chlore en donnant des chlorures, composés très-stables.

Il semble que le chlore soit modifié par la lumière solaire ; ainsi le chlore et l'hydrogène mélangés dans l'obscurité ne réagissent pas l'un sur l'autre, mais si le chlore a été préalablement insolé, la combinaison se fait immédiatement.

Préparation. — Le chlore se prépare en traitant le peroxyde de manganèse

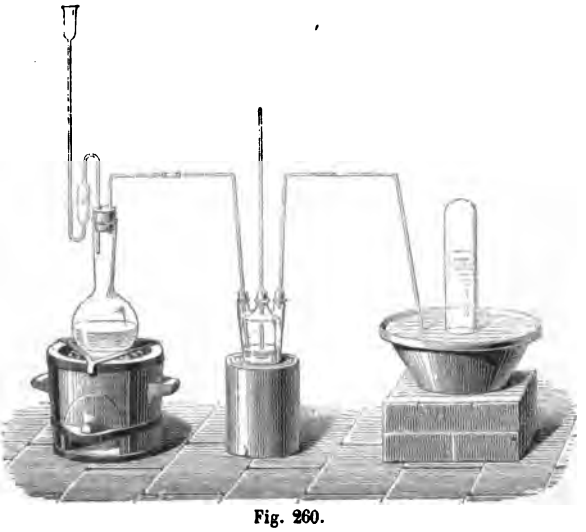


Fig. 260.

MnO^2 par l'acide chlorhydrique HCl. Dans le ballon on met du peroxyde pulvérisé,

et on verse peu à peu l'acide par le tube en S; le gaz traverse un flacon laveur renfermant de l'eau, où il se débarrasse de l'acide chlorhydrique entraîné, et l'on recueille le gaz sur la cuve à eau; comme le gaz est soluble dans l'eau, il faut employer le moins d'eau possible.

Le tube en S ajusté dans le ballon joue le rôle de tube de sûreté ; s'il ne se produit plus de gaz dans le ballon et que la pression baisse, l'eau du flacon laveur pourrait s'élever dans le tube de jonction et se rendre dans le ballon, ce qui serait un inconvénient. Mais, si la pression baisse, le liquide du tube en S monte dans la branche de droite, qui est munie d'un renflement, et il arrive un moment où tout le liquide est dans la branche de droite ; alors l'air extérieur rentre dans l'appareil en traversant la colonne liquide qui redescend aussitôt, et l'équilibre de pression se rétablit.

Le tube central du flacon laveur joue aussi le même rôle ; il plonge d'une certaine quantité dans l'eau du flacon, et si l'atmosphère intérieure vient à prendre une pression moindre, le liquide se déprime dans le tube et il arrive un moment où des bulles d'air rentrent dans le flacon.

Pour obtenir le chlore sec, on fait traverser au gaz, après le flacon laveur, un vase rempli de chlorure de calcium, substance très-avide d'eau. Le gaz se trouve

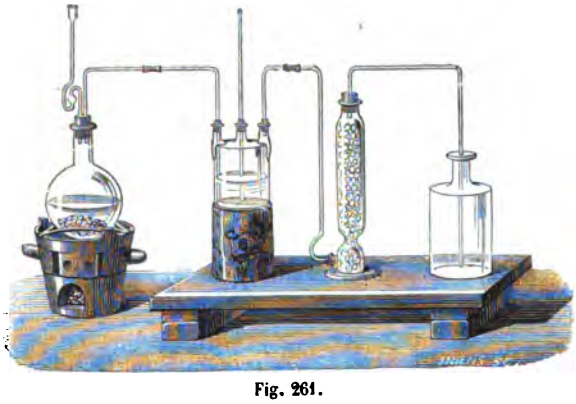


Fig. 261.

desséché et s'en va par le tube abducteur au fond d'un flacon à goulot étroit; vu sa grande densité, le chlore reste au fond du flacon, d'où peu à peu il expulse l'air.

Pour obtenir la dissolution de chlore, on fait passer le gaz dans une série de flacons à trois tubulures comme celui de la figure précédente, et il se dissout. L'appareil prend le nom d'appareil de Woolf. Vers 0°, la dissolution de chlore dépose des cristaux jaunes qui sont un hydrate de chlore ($Cl + 10\,HO$) ; on recueille ces cristaux, on les essuie et on les place dans un tube recourbé fermé à la lampe. On chauffe les cristaux au bain-marie, ils fondent, l'hydrate se décompose, le chlore pur distille et vient se condenser à l'état de chlore liquide dans la seconde branche du tube recourbé, qui est au milieu d'un mélange réfrigérant (*fig.* 262).

Usages industriels. — Le chlore est usité dans le blanchiment des toiles. Autrefois, on exposait pendant longtemps les toiles sur un pré, la matière colorante s'oxydait et donnait une substance brune, soluble dans les alcalis (la potasse et la soude) et qu'un lavage au savon faisait disparaître. Aujourd'hui, les toiles sont

trempées dans une solution de chlore, puis exposées ; le chlore décompose l'eau, et il se produit un dégagement d'oxygène à l'état naissant ; cet oxygène oxyde la matière colorante et la rend soluble dans l'eau de savon.

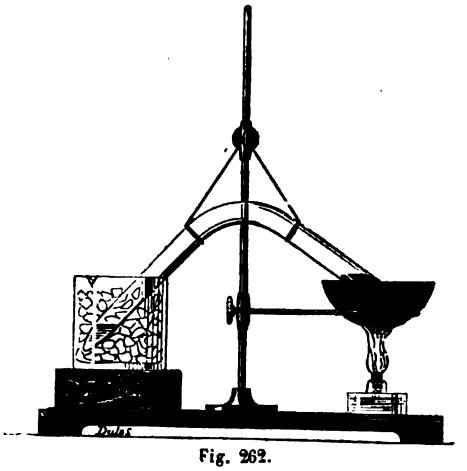


Fig. 262.

Le chlore décompose rapidement toutes les matières de provenance animale et les désorganise profondément ; aussi ne peut-on l'employer au blanchiment de la laine et de la soie.

Le chlore, par son avidité pour l'hydrogène, est susceptible de décomposer presque toutes les matières odorantes ou colorées. L'encre est décomposée par le chlore, car elle est une combinaison d'un sel de fer avec la noix de galle, substance végétale très-sensible à l'influence du chlore ; il reste presque toujours une légère tache de rouille ou oxyde de fer.

En temps de peste, le chlore détruit les miasmes putrides et les rend inoffensifs en leur enlevant leur hydrogène.

Le chlore est difficilement transportable et maniable ; mais il existe une substance, le chlorure de chaux, que nous apprendrons à préparer, qui dégage le chlore sous la moindre influence, et que l'on emploie d'ordinaire pour le blanchiment et la désinfection.

Brome. — Iode. — Le brome est un liquide rougeâtre, dont la densité est 2,97, qui se congèle à — 30°, et dont toutes les propriétés physiques et chimiques sont analogues à celle du chlore. Comme lui, il est brûlant et désorganisateur, très-avide d'hydrogène quoique à un degré moindre ; insoluble dans l'eau, très-soluble dans l'alcool et l'éther.

Pour préparer le sel marin, on évapore à l'air libre les eaux de la mer ; le chlorure de sodium se dépose, et le résidu liquide, qu'on appelle les eaux mères, renferme beaucoup de bromures. Dans cette liqueur, on fait arriver du gaz chlore dont l'affinité chimique est supérieure à celle du brome ; le brome est donc déplacé par le chlore, et si l'on verse sur la liqueur de l'éther, cet éther ne se mélange pas avec le reste du liquide ; il dissout le brome que l'on enlève par décantation.

Le brome n'est guère utilisé qu'en photographie et en médecine.

Son congénère, l'iode, se présente sous la forme de paillettes cristallines à éclat métallique, dont la densité est environ cinq fois plus forte que celle de l'eau. Son odeur est celle du chlore, mais moins intense ; comme lui, il désorganise les matières animales, la peau, par exemple, et décolore les principes végétaux. Les réactions chimiques de l'iode sont analogues à celles du chlore, mais son affinité est moins énergique ; le chlore, le brome et l'iode forment une série décroissante de trois corps analogues, mais le chlore est comme affinité supérieur aux deux autres, et le brome est supérieur à l'iode.

L'iode fond à 107° et bout à 175° ; à toute température il donne de superbes vapeurs violettes (iodés, violet), et une plaque d'argent placée au-dessus d'une couche d'iode solide se recouvre rapidement d'une pellicule d'iodure. C'est en se

servant des plaques ainsi préparées que Daguerre parvint à reproduire l'image des objets extérieurs.

L'iode est peu soluble dans l'eau, très-soluble dans l'alcool, l'éther et la benzine, à laquelle il communique une belle couleur améthyste.

L'iode est avide d'hydrogène, mais à un moindre degré que le chlore et le brome. Les moindres traces d'iode se reconnaissent par la propriété suivante : l'iode produit, en contact avec l'amidon, une coloration bleu violet très-intense; une parcelle minime d'iode suffit à donner cette coloration, et c'est un réactif infaillible.

L'iode se trouve dans les eaux mères des salines à l'état d'iodures alcalins, que l'on décompose par le chlore et l'iode se précipite; on en signale la présence dans certaines sources, dans l'eau de pluie, dans les plantes (fucus et varechs) qui se développent au bord de la mer. Certains lacs sont très-chargés de brome et d'iode, tel est le lac Asphaltite ou mer Morte, en Judée.

L'iode se purifie par distillation; les vapeurs viennent se condenser dans des ballons refroidis.

L'iode est utilisé en photographie et en médecine ; on a cru rencontrer en lui un spécifique puissant contre le goître, infirmité si commune dans les Alpes, la Savoie et la Suisse : en tout cas, c'est un poison qu'il ne faut administrer qu'à faible dose.

Fluor. — A côté du chlore, du brome et de l'iode, se place le fluor dont l'existence est plutôt hypothétique que certaine. On rencontre dans la nature un minéral appelé spath fluor, dont les cristaux cubiques traités par l'acide sulfurique dégagent un gaz, tout à fait analogue aux acides chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique, et qui attaque les métaux comme font ces derniers. Ce gaz a la propriété curieuse d'attaquer le verre, ou plus généralement de décomposer les silicates ; aussi s'en sert-on pour graver les thermomètres, baromètres, etc. Pour le préparer, on fait agir l'acide sulfurique sur le spath fluor dans une cornue de plomb auquel s'adapte un tube de plomb où se condense l'acide fluorhydrique. On admet que le radical de cet acide est un corps simple, le fluor.

Phosphore. — Découvert en 1677 par l'alchimiste Brand, de Hambourg, le phosphore excita vivement la curiosité par la propriété qu'il présente d'être phosphorescent, c'est-à-dire de luire dans l'obscurité. Il est solide, sans odeur, avec une saveur d'ail; on peut le rayer à l'ongle ; insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'alcool et l'éther, très-soluble dans les huiles grasses et volatiles, et surtout dans le sulfure de carbone ; il cristallise en dodécaèdres.

Le phosphore est essentiellement variable de forme et d'aspect ; à l'état solide et transparent sa densité est 1,82 ; on le conserve sous l'eau distillée, mais il ne tarde pas à y devenir opaque : il se produit à la surface une sorte de désagrégation moléculaire qui, peu à peu, pénètre jusqu'au centre. Par la trempe, le phosphore devient noir : il suffit pour cela de le chauffer au delà de son point de fusion puis de le verser dans l'eau froide. A la lumière solaire, le phosphore devient rouge ; on pourrait croire qu'il s'oxyde, il n'en est rien ; la coloration est due simplement à une modification moléculaire, qui peut fort bien se produire dans le vide. Le phosphore rouge est insoluble dans le sulfure de carbone, tandis que le phosphore blanc y est très-soluble : il est donc facile de les séparer.

A l'air, le phosphore blanc ne se conserve pas, il est rapidement oxydé : le posphore rouge, au contraire, se conserve très-bien, et ne s'enflamme qu'à 260°. La densité du phosphore rouge est égale à 2 ; il n'est pas lumineux dans l'obscurité ;

il est inodore et non délétère, tandis que le phosphore amorphe possède une odeur particulière et est très-délétère.

L'affinité du phosphore pour l'oxygène est considérable : nous l'avons mise à profit dans la préparation de l'azote. Chauffé à 60°, le phosphore s'enflamme dans l'oxygène, aussi est-il fort dangereux à manier, et il faut le conserver et le manipuler au milieu de vases pleins d'eau.

A l'air libre, le phosphore (en grec, porte lumière) brûle lentement en émettant des vapeurs et de la lumière.

Préparation. — Les alchimistes retiraient le phosphore de l'urine, aujourd'hui on l'extrait des os qui sont formés de substances organiques unies à des phosphates et carbonates de chaux. On calcine les os à l'air, et la cendre renferme les phosphates de chaux. Le phosphate est neutre, c'est-à-dire qu'il a la formule ($3\,CaO, PhO^5$) ; l'acide phosphorique pour être neutralisé (c'est-à-dire pour que la liqueur devienne indifférente au papier de tournesol) a besoin de trois équivalents de base. Avec les cendres on forme une bouillie liquide à laquelle on ajoute de l'acide sulfurique, on filtre le mélange sur une toile et le liquide qui s'écoule renferme du phosphate acide de chaux. L'équation suivante explique la réaction :

$$CaO,Co^2+3CaO,PhO^5+3(So^3,HO)=3(CaO,So^3)+Co^2+(2HO,CaO,PhO^5)$$

Il se dégage de l'acide carbonique, il reste du sulfate de chaux ou plâtre sur la toile, et la liqueur renferme le phosphate acide qui diffère du phosphate neutre en ce que deux équivalents d'eau ont remplacé deux équivalents de chaux.

La liqueur est concentrée à feu nu, puis on mélange le sirop à du poussier de charbon, on dessèche les briquettes obtenues, et on les calcine dans des cornues en terre auxquelles s'adaptent une allonge et un récipient à moitié plein

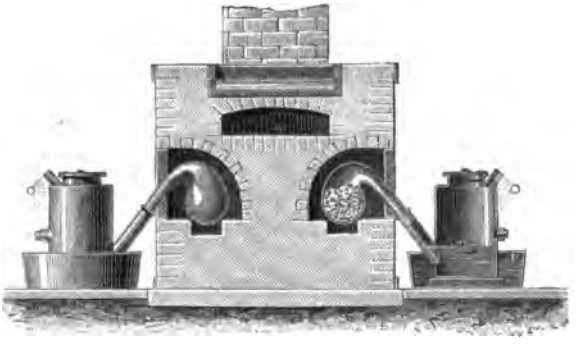


Fig. 263.

d'eau. Le phosphore vient se condenser sous l'eau, et par l'orifice latéral du récipient se dégagent des gaz inflammables qui sont de l'oxyde de carbone, des carbures d'hydrogène et des phosphures d'hydrogène. L'équation suivante présente un des côtés de la réaction :

$$5C+2(CaO,PhO^5)=5Co+(2CaO)PhO^5+Ph.$$

Il reste dans la cornue un phosphate basique ; pour purifier le phosphore ! on le comprime dans une peau de chamois à travers laquelle il passe et se trouve filtré.

Usages industriels. — Le principal usage industriel est la fabrication des allumettes chimiques. Les allumettes ordinaires se garnissent avec une pâte formée de phosphore en poudre, de chlorate ou d'azotate de potasse, et d'une matière colorante comme le minium ou le bleu de Prusse, et enfin d'une matière gommeuse destinée à relier le tout. Le chlorate ou l'azotate de potasse (salpêtre) sont facilement décomposables et donnent l'oxygène nécessaire pour commencer la combustion lorsqu'on les décompose par le frottement. Depuis quelques années, on a fait des allumettes au phosphore amorphe, qui n'est autre que le phosphore rouge : les allumettes Coignet, par exemple, sont garnies d'une pâte formée de chlorate de potasse, sulfure d'antimoine et colle forte ; et le carton sur lequel on les frotte est enduit d'un mélange de phosphore amorphe, sulfure d'antimoine et colle forte.

Le phosphore se rencontre dans tous les organes animaux et végétaux ; il est indispensable à leur nutrition et à leur développement ; les phosphates sont pour les terres cultivées un excellent amendement.

Arsenic. — L'arsenic est un corps solide, gris d'acier, à éclat métallique, très-oxydable à l'air, se conservant dans l'eau distillée, sa densité est 5, 7 ; inodore, insipide, il se volatilise au rouge sombre sans passer par la fusion. Pour le fondre, il faut le chauffer dans une atmosphère à haute pression.

L'arsenic brûle dans l'oxygène à une température peu élevée ; il donne une flamme d'un bleu pâle. De même, il brûle dans le chlore à la température ordinaire.

L'arsenic n'est pas vénéneux par lui-même ; mais son oxyde, l'acide arsénieux (AsO^3) ou arsenic du commerce est un poison violent.

On trouve dans la nature des minerais qui sont des arsénio-sulfures de nickel et de cobalt : pour en extraire les métaux, on grille ces minerais dans un courant d'air ; il se dégage de l'acide sulfureux qui s'en va dans l'atmosphère et de l'acide arsénieux qui se condense dans les chambres froides.

L'acide arsénieux est solide ; il est dimorphe et on le trouve tantôt à l'état de masses vitreuses cristallisées, tantôt à l'état de substance mate analogue à la porcelaine. Il est soluble et très-rapidement absorbé ; pris à forte dose, c'est un vomitif, et il est moins dangereux ; l'antidote de l'acide arsénieux est la magnésie non calcinée ou l'oxyde de fer qui donnent avec lui des sels insolubles et par suite inoffensifs.

L'arsenic, corps simple, se prépare en distillant l'acide arsénieux avec du charbon. L'arsenic forme avec l'hydrogène un hydrogène arsénié, facilement décomposable par la chaleur.

L'acide arsénieux, ou arsenic vulgaire, est un poison usuel, qu'il est utile de pouvoir reconnaître ;

1° Si on a les matières vomies, ou trouvées dans l'estomac, on peut souvent en extraire une poudre blanche pesante, qui, projetée sur les charbons ardents, y brûle avec une odeur d'ail caractéristique ; chauffez cette poudre dans un tube de verre avec du charbon, l'acide arsénieux est décomposé, et à la partie supérieure du tube vient se former un anneau métallique et brillant d'arsenic. On dissout la matière de cet anneau par l'acide chlorhydrique, et on verse dans la liqueur de l'acide sulfhydrique, qui donne un précipité jaune facilement reconnaissable de sulfure d'arsenic ou orpiment ;

2° Il arrive quelquefois que la présence du poison ne peut se constater aussi facilement ; par exemple, lorsqu'on fait les recherches plusieurs jours et même plusieurs mois après la mort. Il faut alors prendre les viscères, le cœur, l'esto-

mac, les intestins, les chauffer avec de l'acide sulfurique pur et concentré, afin de détruire toutes les matières organiques : il ne reste qu'un charbon brillant où se trouve l'arsenic. On traite alors par l'acide azotique, afin de transformer l'arsenic en acide arsénieux, et même en acide arsénique AsO^5, qui est plus so-

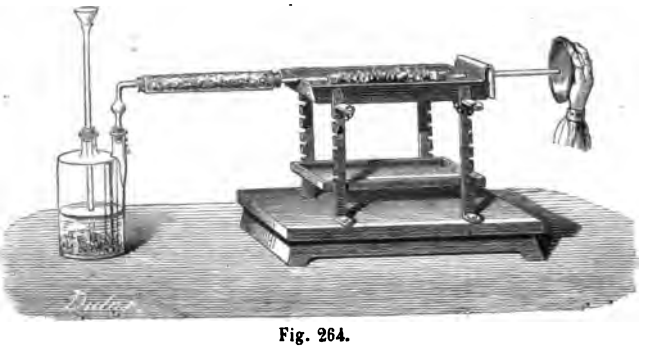


Fig. 264.

luble, et on le reprend par l'eau distillée. Cette eau distillée donne avec l'acide sulfhydrique le précipité jaune d'orpiment; et, en outre, on en essaye une portion à l'appareil de Marsh. L'appareil se compose d'un flacon producteur d'hydrogène (eau et grenaille de zinc, sur laquelle on verse de l'acide sulfurique) : dans ce flacon on a introduit la substance que nous supposons arsenicale. L'hydrogène naissant décompose l'acide arsénieux, suivant l'équation

$$AsO^3 + 6H = 3HO + AsH^3$$

Il se dégage donc du gaz hydrogène arsénié, qui traverse un tube chauffé au rouge, où il se décompose; l'arsenic métallique se dépose en anneau noir miroitant; et même si on allume le gaz qui se dégage à l'extrémité, on obtient une flamme livide et allongée; écrasez cette flamme par une soucoupe de porcelaine, il se déposera sur la soucoupe une poussière noire d'arsenic.

Le gaz qui se dégage entraîne toujours des gouttelettes d'eau tenant en suspension du sulfate de zinc, qui par la chaleur se réduit à l'état d'oxysulfure de zinc, lequel est noir et pulvérulent : on aperçoit sur la figure un petit tube rempli d'amiante, et destiné à parer à cet inconvénient; l'amiante retient les gouttelettes entraînées.

L'anneau miroitant et les taches noires de la soucoupe pourraient fort bien être dus à l'antimoine, et l'on comprend combien alors l'erreur serait grave, car l'antimoine entre dans beaucoup de médicaments, l'émétique, par exemple. Il y a pour faire la distinction entre l'arsenic et l'antimoine un procédé simple, qui consiste à traiter l'anneau miroitant par un peu d'acide azotique, sursaturer par de l'ammoniaque, évaporer à sec et reprendre par de l'eau distillée : on traite alors la liqueur par l'azotate d'argent, et si l'on a opéré sur de l'arsenic, il se forme un précipité rouge brique d'arséniate d'argent; si l'on a opéré sur de l'antimoine, c'est un précipité blanc d'antimoniate d'argent.

D'après ce qui précède, on voit qu'il faut entourer la recherche de l'arsenic de précautions minutieuses.

A faible dose, l'acide arsénieux est un médicament qu'on emploie pour diminuer la plasticité du sang, pour combattre l'apoplexie.

Carbone. — Le carbone est le corps le plus répandu de la nature; le diamant

est du carbone pur ; à l'état plus ou moins impur, il constitue les combustibles minéraux, qui prennent le nom d'anthracite, de houille et de tourbe ; il entre dans presque tous les composés organiques, et forme la charpente végétale et animale ; les carbonates sont très-nombreux, et entrent pour beaucoup dans la constitution de l'écorce terrestre.

Le carbone se présente sous diverses formes ; il a deux caractères typiques : jusqu'ici on n'a pu arriver à le fondre, et il brûle dans l'oxygène, en donnant un gaz facile à reconnaître, l'acide carbonique.

Diamant. — Le diamant se trouve surtout au Brésil et dans l'île de Bornéo, au milieu de terrains d'alluvion renfermant des débris de roches anciennes. Il est souvent entouré d'une gangue opaque ; le diamant le plus recherché est blanc ; il en existe de bleus, de jaunes et de noirs. Le diamant est du carbone pur cristallisé dans le premier système (octaèdre régulier) ; densité 3,5 ; non conducteur de la chaleur et de l'électricité, il est de tous les corps celui qui réfracte le plus la lumière ; il est combustible, et donne de l'acide carbonique pur.

On a essayé de faire cristalliser le charbon pour avoir du diamant : M. Despretz, avec une pile puissante de 600 éléments, est arrivé seulement à ramollir le charbon des cornues à gaz ; en décomposant le chlorure de carbone par une pile faible, il a fini par obtenir des cristaux élémentaires ou petits diamants, rassemblés au pôle négatif. La valeur du diamant croît comme le carré du poids, qui s'exprime en carats (le carat est une petite fève de l'Asie).

Par la chaleur d'une pile puissante, le diamant se boursoufle, mais ne fond pas.

Le diamant est le plus dur des corps, il raye tous les autres ; pour le tailler, on se sert de poudre formée avec des diamants de rebut. Ces éclats de diamant sont employés aussi pour couper le verre.

Graphite. — La fonte de fer, sursaturée de charbon, dégagé en se refroidissant des cristaux en lames noires très-brillantes, qui semblent être du charbon pur ; — on appelle ce corps le graphite. — Dans les terrains anciens, on trouve encore le graphite (ou plombagine) sous forme de paillettes hexaèdriques.

Anthracite. — L'anthracite est un charbon pur, compacte, très-difficile à allumer, mais qui est un combustible précieux, si on peut lui fournir assez d'oxygène. La houille, sur laquelle nous aurons lieu de revenir en géologie, est un charbon de terre moins parfait que l'anthracite.

La houille, calcinée en vase clos, dégage un mélange de gaz nombreux, lequel mélange purifié forme le gaz d'éclairage ; le résidu est le coke ; on a environ 60 de coke pour 100 de houille. Le coke est employé, soit au chauffage des locomotives, soit au chauffage domestique.

Noir de fumée. — Les corps gras, les huiles, les résines sont très-riches en carbone, et éprouvent à l'air une combustion incomplète ; leur flamme est fumeuse, et dépose du charbon en poudre, dit noir de fumée, qui, calciné à l'abri de l'air, donne du carbone pur.

L'appareil ci-joint montre comment on se le procure : il se dépose sur un cône en tôle, que l'on descend de temps en temps, et que l'on racle (*fig.* 265).

Le noir de fumée sert à préparer l'encre de Chine, l'encre d'imprimerie : c'est un corps décolorant et désinfectant.

Charbon de bois. — S'il est chauffé en vase clos, ou s'il ne reçoit qu'une quantité d'air insuffisante, le bois se carbonise, dégage de nombreux gaz, et, en définitive, il reste du charbon de bois. Les gaz qui se dégagent sont variables avec la marche de l'opération et avec la température : chauffé au rouge, le car-

bone brûle en dégageant de l'acide carbonique CO^2, ou de l'oxyde de carbone CO, suivant que la combustion est complète ou incomplète. Si le bois a été chauffé brusquement, le charbon se trouve en présence de l'eau, qui ne s'est pas com-

Fig. 265.

plétement dégagée, et il la décompose; il est donc important de n'élever que lentement la température du bois, afin de chasser toute l'humidité et de ne point perdre une partie du charbon.

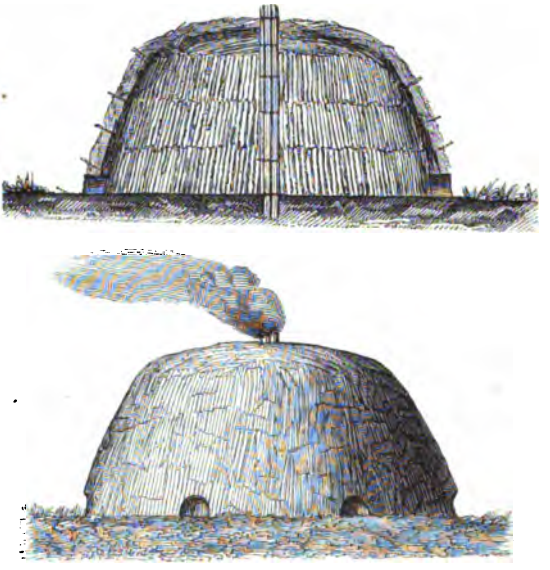


Fig. 266.

On comprend dès lors que le rendement doit être très-variable.

La méthode moderne est la distillation du bois en vase clos : on place le bois

dans des chaudières en tôle chauffées en dessous; à ces chaudières s'adapte un tube qui laisse passer les gaz; ces gaz entraînent des huiles, des goudrons et de l'acide acétique (vinaigre de bois), et on recueille toutes ces matières. Ce qui reste des gaz est combustible, et peut être utilement employé à chauffer les chaudières. 100 parties de bois desséché pendant un an rendent à la distillation 27 parties de charbon.

Cette méthode est d'une installation coûteuse, et dans les forêts on emploie toujours le procédé des meules : on dispose quelques bûches verticalement, de manière à former une cheminée, autour de laquelle on empile trois couronnes de bois placé debout; la meule ainsi formée est recouverte de branchages et de gazons, de façon à intercepter l'air; cependant, on ménage, à la base, des trous ou évents. Dans la cheminée on jette des branchages, que l'on allume par le haut, la combustion se transmet de proche en proche et du haut vers le bas : on la conduit, en perçant de place en place dans les gazons des trous que l'on bouche ensuite. Il se dégage d'abord une fumée blanche, très-chargée de vapeur d'eau; puis elle devient ensuite transparente et bleuâtre, parce qu'elle ne renferme plus guère que de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone.

Par ce procédé, 100 parties de bois donnent 17 parties de charbon, au lieu de 27, qu'on obtient par la distillation.

Noir animal. — Les os renferment 30 pour 100 de matières organiques très-riches en carbone : calcinés en vase clos, ils donnent une masse spongieuse que l'on broie sous des meules, et qui est un charbon impur mélangé à des carbonates et phosphates de chaux.

Le noir animal est excessivement décolorant; il décolore l'indigo, le tournesol, le vin rouge, et on l'emploie au blanchiment des sucres bruts. Il possède, en outre, à un haut degré le pouvoir d'absorber les gaz, même quand ils sont en dissolution; les eaux saumâtres, filtrées à travers une couche de noir animal, deviennent potables. Cette propriété d'absorber les gaz, et de désinfecter les liquides, existe à un très-haut degré dans le charbon de bois ordinaire, qui peut absorber jusqu'à 90 fois son volume d'ammoniaque, 35 fois son volume d'acide carbonique, 9 fois son volume d'oxygène. Les volumes de gaz absorbés par le charbon décroissent comme les coefficients de solubilité de ces gaz dans l'eau. Par la chaleur les gaz absorbés se dégagent.

Le noir animal dont on se sert devient rapidement inactif; on le révivifie en le calcinant en vase clos.

Le charbon des cornues à gaz est un charbon très-compacte, qui s'attache aux parois de ces cornues, et reste soumis à l'influence prolongée de la chaleur : cette sorte de charbon conduit bien la chaleur et l'électricité.

Le charbon a la propriété de décomposer par la chaleur presque tous les composés oxygénés, et de s'emparer de leur oxygène.

Bore. — Le bore est très-analogue au carbone pour ses propriétés physiques. On le connaît sous trois états :

1° *Bore amorphe.* — Dans un creuset de fonte chauffé au rouge on jette un mélange d'acide borique fondu et de sodium en fragments; on ferme le creuset, et on agite la masse de temps en temps, puis on la projette dans l'eau froide, et par des lavages successifs on obtient une poudre verte, qui est du bore amorphe. Le sodium a décomposé l'acide borique pour lui enlever son oxygène, et former de la soude qui, avec l'acide borique non décomposé, a donné du borate de soude.

2° *Bore graphitoïde.* — On fait passer un mélange de chlorure de bore $BoCl^3$

et d'oxyde de carbone CO sur de l'aluminium chauffé au rouge dans un tube, il se forme un borure d'aluminium qui, décomposé par l'acide chlorhydrique, abandonne le bore graphitoïde ;

3° *Bore adamantin* ou *cristallisé.* — On fabrique un creuset dans un morceau de charbon de cornue à gaz, et l'on y met quelques gros morceaux d'aluminium avec de l'acide borique en fragments. On chauffe le creuset dans un autre creuset de plombagine, qui est très-réfractaire, de façon à maintenir le mélange en fusion. Au bout de quelques heures, on laisse refroidir, on casse le creuset, et on trouve un culot d'aluminium imprégné de cristaux de bore.

Le bore cristallisé est infusible, brûle dans l'oxygène et dans le chlore ; il raye les diamants les plus durs, et présente les couleurs les plus diverses avec un grand éclat et une grande réfringence.

Silicium. — L'acide silicique ou silice est un corps fort répandu dans la nature, et que l'on peut décomposer par le potassium et le sodium. On obtient alors une poudre brune, infusible, fixe, et insoluble comme le bore et le carbone. Le chlorure de silicium, traité au rouge par le sodium, peut donner à la fois du silicium graphitoïde et du silicium cristallisé ou adamantin.

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DES MÉTALLOÏDES

Air atmosphérique. — L'air n'est pas un composé : c'est un simple mélange d'oxygène et d'azote.

C'est un gaz incolore, bleuâtre sous de grandes épaisseurs ; c'est à lui qu'on rapporte la densité des autres gaz ; un litre d'air pèse à 0°, et sous la pression 0,76, 1^{gr},293. Il est formé d'oxygène et d'azote pour la plus grosse part ; mais il renferme, en outre, tous les gaz qui peuvent se dégager et exister à la surface de la terre : l'acide carbonique, l'eau, l'ammoniaque, l'acide sulfhydrique, l'iode, etc... ; il tient en suspension des particules organiques, dont quelques-unes sont certainement vivantes.

C'est à Lavoisier que l'on doit l'analyse de l'air. Au moyen âge, on avait bien remarqué que des métaux, l'étain par exemple, chauffés à l'air, changeaient d'aspect et de forme en augmentant de poids ; et l'un des alchimistes de l'époque alla jusqu'à dire que l'air imprégnait les métaux, comme l'eau peut imprégner le sable. Ce fait est vrai, seulement un seul des éléments de l'air, l'oxygène, est actif, et vient s'ajouter aux corps pour les modifier.

Malgré ces expériences connues, la science s'en tint longtemps à la théorie du phlogistique : le phlogistique était une substance, ou plutôt un fluide, qui pouvait s'ajouter aux corps ou les quitter ; les métaux possédaient le phlogistique, et ce qu'on appelait les terres, nos oxydes d'aujourd'hui, étaient des métaux déphlogistiqués. On voit que cette théorie arrivait à donner au phlogistique une pesanteur négative.

Lavoisier réforma cette théorie par l'expérience suivante.

Dans un ballon à long col il plaça du mercure ; le col, deux fois recourbé, se rendait sous une cloche pleine d'air, placée au-dessus de la cuve à mercure ; en aspirant avec un siphon, il enleva une partie de l'air confiné sous la cloche, et le niveau du mercure s'y éleva à une hauteur qu'il nota. Puis, pendant plusieurs jours, il chauffa le mercure du ballon au-dessous de l'ébullition, et ce mercure se recouvrit d'une poudre rouge, qui finit par ne plus augmenter. Il constata

à ce moment, que le volume de l'air confiné avait diminué de 1/5, et que le gaz restant était irrespirable, et n'entretenait plus la combustion.

D'autre part, il recueillit la poudre rouge, et la chauffa à une température plus

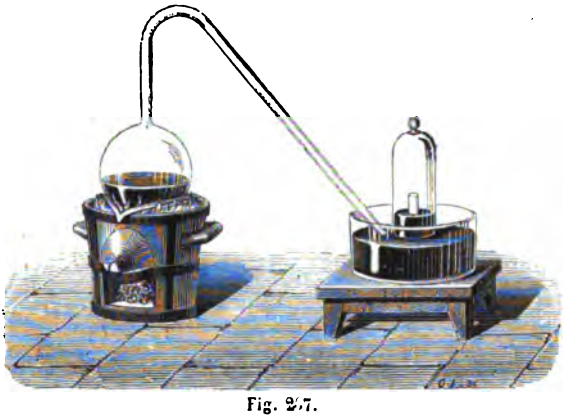


Fig. 267.

élevée que celle de l'ébullition du mercure; il se dégagea un gaz qu'il recueillit, dont le volume était égal au volume disparu, et qui entretenait énergiquement la combustion et la respiration. En mêlant ce dernier gaz au premier, Lavoisier reconstitua l'air atmosphérique.

Scheele arrivait au même résultat, en absorbant l'oxygène d'un volume donné d'air par des sulfures qui se transformaient en sulfates.

On se sert aujourd'hui de plusieurs procédés de dosage très-exacts.

Dosage en volume. — 1° *Par le phosphore à froid.* — Dans un tube gradué on introduit 100 parties d'air, puis un bâton de phosphore humide; il se forme de l'acide phosphoreux que l'eau entraîne. L'absorption complète de l'oxygène est

Fig. 268.

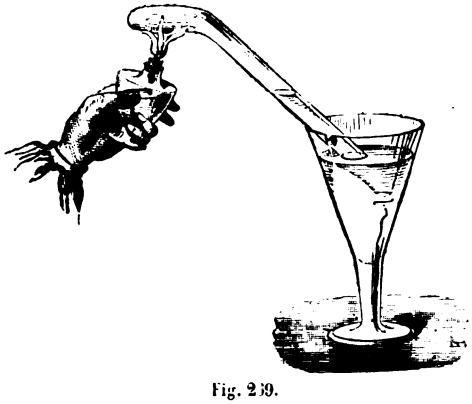


Fig. 269.

achevée lorsque le phosphore, transporté dans l'obscurité, n'est plus lumineux. On trouve alors qu'il reste dans l'éprouvette 79 parties de gaz, c'est de l'azote, qui était mélangé à 21 parties d'oxygène;

2° *Par le phosphore à chaud.* — Dans l'ampoule d'une éprouvette recourbée on place un fragment de phosphore, et l'on chauffe avec une lampe à alcool, légèrement d'abord pour chasser la vapeur d'eau, puis énergiquement pour enflammer le phosphore. Si la chaleur n'était pas assez vive, le phosphore se

vaporiserait, et une explosion serait à craindre. A un moment donné, le phosphore s'enflamme, une lueur parcourt l'éprouvette, et l'expérience est terminée. Il reste 79 d'azote, et 21 parties d'oxygène ont été absorbées.

3° *L'acide pyrogallique et la potasse mélangés absorbent très-rapidement l'oxygène d'un mélange.* — C'est un procédé d'analyse expéditif et commode;

4° *Analyse eudiométrique.* — Mélangeons dans un tube 100 parties d'air et 100 parties d'hydrogène, et faisons passer une étincelle électrique dans le mélange; il y a détonation, et il se forme de l'eau, qui se condense instantanément. Le volume de gaz restant n'est plus que 137, au lieu de 200 : 63 volumes de gaz ont disparu pour former de l'eau; or l'eau est formée de 2 d'hydrogène pour 1 d'oxygène, le volume d'oxygène disparu est donc représenté par le tiers de 63, c'est-à-dire par 21.

Il existe un eudiomètre de Gay-Lussac, mais le plus simple est l'eudiomètre de Mitscherlich dont la figure est ci-jointe, et qui se compose d'une éprouvette reposant sur la cuve à mercure et traversée à la partie supérieure par deux pointes métalliques entre lesquelles jaillit l'étincelle.

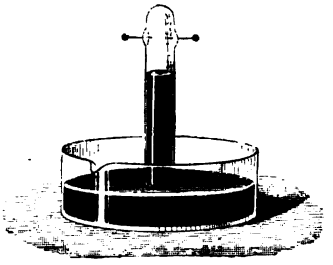


Fig. 270.

Dosage en poids. — On n'obtient par les méthodes précédentes que des résultats peu exacts, car on opère sur de petites quantités d'air et la mesure des volumes est plus sujette à erreur que la mesure des poids. En outre on ne connaît pas la quantité d'eau, d'acide carbonique que l'air renferme. Mieux vaut absorber les différents éléments de l'air par des corps dont on cherchera ensuite l'augmentation de poids.

1° *Procédé de Dumas et Boussingault* (V. planche I, fig. 271). — Dans un ballon en verre B de 15 à 20 litres, on fait le vide, et on pèse le ballon vide. Il s'adapte à un tube de verre peu fusible T, rempli de planures de cuivre poreux (ces planures s'obtiennent en prenant des copeaux de cuivre que l'on oxyde par la chaleur et qu'on ramène ensuite à l'état de cuivre pur par un courant d'hydrogène) : le tube T est fermé par des robinets, et on peut y faire le vide. En avant de lui s'adaptent une série de tubes à boules de Liebig remplis d'une dissolution de potasse concentrée destinée à absorber l'acide carbonique, et une série de tubes en U remplis de pierre ponce humectée d'acide sulfurique concentré, destiné à retenir l'humidité de l'air. Le ballon B est vide, le tube T aussi. On les pèse et soit P et p leurs poids : on porte le tube T au rouge, puis on ouvre le robinet de droite et il se fait un appel d'air. Au contact du cuivre rougi, l'air perd son oxygène; on ouvre alors le robinet de gauche (r) puis celui du ballon B, de manière à produire une aspiration régulière; l'air se dépouille de son eau et de son acide carbonique dans les tubes en U et dans les tubes de Liebig, l'oxygène est fixé par le cuivre et l'azote se rend dans le ballon. Quand il ne se produit plus de courant gazeux dans les boules, on arrête l'opération, on ferme tous les robinets. Le ballon B est pesé de nouveau, plein d'azote. Soit P' son poids; P' — P est le poids d'azote, auquel il faut ajouter cependant l'azote qui forme l'atmosphère du tube T. On pèse ce tube, soit p' son poids, puis on y fait le vide, et soit p'' son poids; $p' - p''$ est le poids de l'azote contenu dans le tube et le poids de l'oxygène absorbé est $p'' - p$. On a donc :

$$\text{Poids de l'azote} = P' - P + p' - p'',$$
$$\text{Poids de l'oxygène} = p'' - p,$$

On trouve ainsi que 100 parties d'air sont formées en poids de :

23 d'oxygène
et 77 d'azote;

Connaissant la composition en poids, il est facile, par les densités, de passer à la composition en volumes;

La densité de l'oxygène étant de 1,1056, le volume correspondant au poids 23 d'oxygène sera

$$X = \frac{23}{1,1056} = 20,81;$$

La densité de l'azote étant 0,9714, le volume correspondant au poids 77 d'azote sera

$$Y = \frac{77}{0,9714} = 79,19;$$

de sorte que la composition exacte de l'air en volumes est la suivante :

20,8 volumes d'oxygène
79,2 volumes d'azote
donnent 100,0 volumes d'air.

Ce résultat s'applique à l'air dépouillé de l'eau et de l'acide carbonique qu'il contient en quantité variable.

M. Boussingault arrive à doser l'eau et l'acide carbonique contenus dans l'air au moyen d'une série de tubes en U garnis de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique et d'appareils de Liebig.

La quantité d'acide carbonique contenue dans l'air varie entre 4 et 6 dix-millièmes : elle est plus forte dans les lieux habités qu'en rase campagne ; elle diminue à la suite de fortes pluies parce que l'eau dissout l'acide carbonique. Par suite de la respiration des plantes qui absorbent de l'acide carbonique pendant le jour, la proportion est plus forte la nuit que le jour.

On rencontre encore dans l'air des carbures d'hydrogène, que l'on croit provenir de la décomposition des substances putrides ou miasmes enlevés à certaines régions malsaines.

Nous avons dit en commençant que l'air était un mélange; cela résulte des observations suivantes :

1° L'air renferme des volumes d'oxygène et d'azote qui ne sont pas en rapport simple, et les gaz ne se combinent que dans des rapports de volume très-simples.

2° Le mélange de l'oxygène et de l'azote se fait sans manifestation de chaleur, de lumière ou d'électricité.

3° Si l'on recueille sur la cuve à mercure le gaz qui se dégage d'un ballon plein d'eau légèrement échauffée; on constate que dans ce gaz les volumes d'oxygène et d'azote sont dans le rapport de leurs coefficients de solubilité. L'air n'a donc pas un coefficient propre de solubilité, et les deux gaz qui le forment semblent se dissoudre séparément.

De la combustion. — Nous avons donné le mot combustion comme synonyme du mot combinaison chimique. Dans la pratique, les combustions qui nous procurent de la chaleur ou de la lumière sont des oxydations. Le fond des matières combustibles est le carbone et l'hydrogène, et chaleur et lumière sont dues à l'union de ce carbone et de cet hydrogène avec l'oxygène de l'air, union d'où résultent de l'oxyde de carbone, de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau.

La combustion a donc pour effet de vicier l'air dans un espace limité : nous aurons à revenir sur ce point en parlant de l'acide carbonique.

La lumière et la chaleur s'accompagnent généralement, mais elles ne croissent pas proportionnellement l'une à l'autre. Ainsi la combustion de l'hydrogène donne beaucoup de chaleur avec une flamme très-pâle. Nous avons déjà vu que, pour qu'une flamme soit brillante, il est nécessaire que le gaz à la combustion duquel elle est due renferme des particules solides ou en fournisse en se décomposant. Nous aurons la preuve des faits précédents en examinant la flamme d'une bougie. A la base du cône est une zone bleuâtre et de faible intensité (*i*); puis une zone blanche (*b*) et enfin au centre une zone brillante. La colonne d'air

Fig. 271.

Fig. 272.

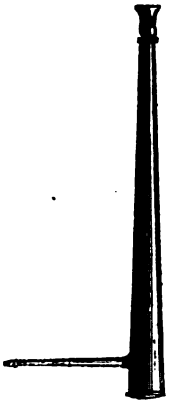


Fig. 273.

échauffée par la bougie appelle un air nouveau qui arrive par la base : l'oxygène se trouve en excès, la combustion est incomplète, et il se produit surtout de l'oxyde de carbone (CO) ; dans la zone du milieu, l'oxygène est en quantité suffisante pour brûler complétement le carbone et l'hydrogène, d'où une flamme blanche peu éclairante, il se forme de l'acide carbonique et de l'eau; à la partie centrale, il n'arrive pas assez d'air, il y a combustion incomplète, du charbon reste en suspension dans la flamme, et on peut le recueillir à l'état de noir de fumée sur une soucoupe de porcelaine, c'est à ces particules solides qu'est dû l'éclat de la flamme.

Mais si la quantité de carbone est trop considérable, l'effet est dépassé, et l'on a une flamme fumeuse peu éclairante. C'est le cas de l'huile brûlée par une mèche plate. Il faut alors recourir à la mèche cylindrique, afin d'avoir un double courant d'air, interne et externe.

Il résulte de ce qui précède que la base de la flamme d'une bougie renferme de l'oxygène en excès, c'est donc là qu'il faut placer les métaux qu'on veut oxyder par la chaleur : au contraire la partie centrale manque d'oxygène et c'est là qu'il faut placer les corps que l'on veut désoxyder, les oxydes métalliques, par exemple, que l'on se propose de réduire.

Pour augmenter la chaleur donnée par une flamme, il faut augmenter la vitesse de combustion, c'est-à-dire faire arriver plus d'air dans un temps donné. Dans nos foyers on se sert pour cela du soufflet ; dans les laboratoires on recourt au chalumeau; instrument très-simple, composé d'un tube en cuivre avec embou-

chure en ivoire ; à ce tube s'adapte à angle droit un ajutage garni de platine ; on souffle par l'embouchure de façon à envoyer de l'air qui n'ait point passé par les poumons, c'est-à-dire qui ne soit pas chargé d'acide carbonique, cet air se comprime et sort avec une grande vitesse de la pointe du chalumeau. Avec ce courant d'air, on peut, dans une bougie, produire un dard de flamme possédant une température élevée.

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DE L'AZOTE

Protoxyde d'azote (AzO). — Le protoxyde d'azote est un gaz incolore, inodore, à saveur sucrée. Densité 1,5. Cinq volumes d'eau dissolvent quatre volumes de ce gaz. Il renferme beaucoup d'oxygène et l'abandonne très-facilement aussi entretient-il la combustion avec une énergie comparable à celle de l'oxygène pur ; on peut vérifier ce fait en brûlant du soufre, du phosphore, dans le protoxyde d'azote.

Sa propriété la plus curieuse est de produire, lorsqu'on le respire, une sorte

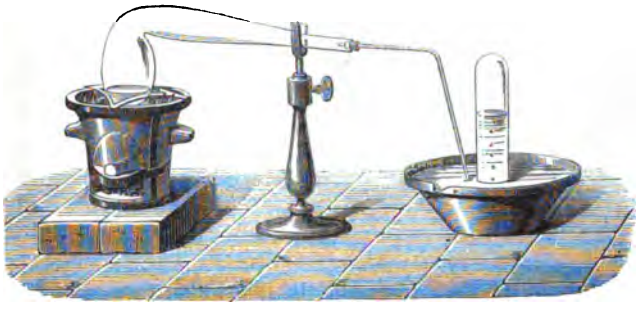


Fig. 274.

d'ivresse accompagnée de gaieté folle ; aussi l'appelle-t-on gaz hilarant. L'expérience deviendrait très-dangereuse si on la prolongeait.

Le protoxyde d'azote a été liquéfié à 0° sous une pression de 30 atmosphères. On le prépare en décomposant par la chaleur l'azotate d'ammoniaque, que l'on chauffe modérément dans une cornue de verre. La réaction est exprimée par l'équation :

$$AzH^5,Ho,AzO^5 = 4Ho + 2AzO.$$

L'analyse apprend que le protoxyde d'azote est formé de deux volumes d'azote et d'un volume d'oxygène condensés en deux volumes.

Bioxyde d'azote (AzO^2). — C'est un gaz incolore, de densité 1,04, non liquéfié jusqu'à présent, peu soluble. Il est plus stable que le précédent, aussi n'entretient-il pas la combustion ; c'est un gaz neutre, formé de volumes égaux d'azote et d'oxygène. On le sépare du protoxyde lorsqu'il est mélangé avec lui, en agitant le mélange, avec une dissolution de sulfate de protoxyde de fer qui du vert passe au brun en absorbant tout le bioxyde d'azote.

On le prépare en décomposant le cuivre par l'acide azotique.

$$3Cu + 4AzO^5 = 3(CuO,AzO^5) + AzO^2$$

La propriété caractéristique du bioxyde d'azote est une tendance continuelle à

l'oxydation supérieure ; au contact de l'air, il se répand immédiatement en vapeurs rutilantes d'acide hypoazotique (AzO^4).

Acide azoteux (AzO^3). — L'acide azoteux est très-difficile à préparer pur. On obtient généralement les azotites en décomposant les azotates par la chaleur.

$$Ko,AzO^5 = 2O + Ko,AzO^3.$$

Acide hypoazotique (AzO^4).— A 9°, l'acide hypoazotique est une masse blanche fibreuse. A 0°, il est liquide, jaune brun, puis sa couleur brune se fonce de plus en plus jusqu'à + 22°, où il entre en ébullition en donnant des vapeurs rutilantes caractéristiques. Il corrode les matières organiques ; en présence des bases ou seulement de l'eau, il se décompose en acide azoteux et acide azotique :

$$(2AzO^4) + 2KO = KO,AzO^5 + KO,AzO^3.$$

On le prépare en décomposant l'azotate de plomb (PbO,AzO^5) par la chaleur ; l'acide azotique tend à se dégager, mais comme il n'existe pas à l'état anhydre, il

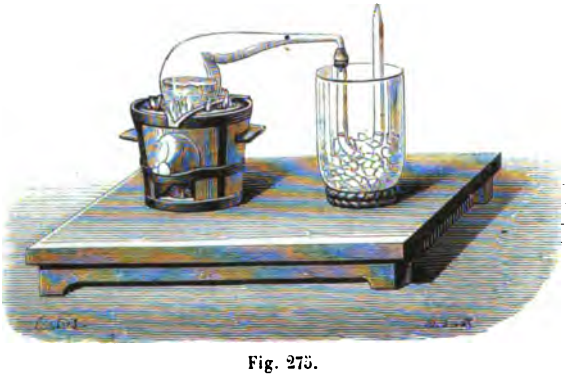


Fig. 275.

se résout en acide hypoazotique que l'on condense au milieu d'un mélange réfrigérant.

Acide azotique (AzO^5,Ho). — L'acide azotique n'existe pas à l'état anhydre. Sa dissolution concentrée est un liquide incolore, odorant ; il corrode énergiquement les substances organiques. Lorsqu'il est le plus concentré possible, sa densité est un 1,5 et il bout à 86°. Par la chaleur, il se dédouble en oxygène et acide hypoazotique, et si la chaleur est très-élevée il se dédouble simplement en oxygène et azote. L'acide azotique forme avec l'eau deux hydrates ayant des points d'ébullition différents et fixes : AzO^5,HO bout à 86° et $(AzO^5)4HO$ bout à 123°.

Le phosphore et le soufre bouillis avec l'acide azotique se transforment en acides phosphorique et sulfurique.

L'acide azotique est un oxydant très-énergique ; il attaque tous les métaux, excepté l'or et le platine. Quelquefois le métal en prenant l'oxygène forme un acide, ainsi l'étain donne l'acide stannique (SnO^2) : généralement il se forme un oxyde basique qui avec le reste de l'acide engendre un azotate, c'est ce qui arrive avec le cuivre, le zinc, l'argent, le mercure ; comme il y a toujours décomposition d'une portion de l'acide, il se dégage des vapeurs rutilantes qu'il faut se garder de respirer. Les acides purs et concentrés recouvrent l'argent d'une couche qui arrête la réaction ; en général il vaut mieux se servir d'un acide peu con-

centré. Pour que l'attaque soit énergique, il semble nécessaire que l'acide ne soit pas parfaitement pur, mais renferme un peu de bioxyde d'azote ou d'acide azoteux.

Le fer est violemment attaqué par les acides faibles, il ne l'est pas par les acides concentrés, et même, quand il a été plongé dans les acides concentrés, il n'est plus attaqué par les acides faibles.

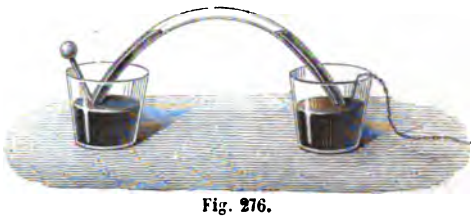


Fig. 276.

L'acide azotique détruit les matières animales et les colore en jaune; c'est ainsi par exemple qu'il agit sur la laine et la soie.

Préparation. — Faites passer une série d'étincelles électriques dans un mélange composé de 3 volumes d'azote et de 7 d'oxygène, lequel mélange est contenu dans un tube recourbé et se trouve en présence de quelques gouttes de potasse; les gaz disparaissent et l'on obtient de l'azotate de potasse. C'est par cette méthode qu'on établit la composition de l'acide azotique, que l'on en fait la synthèse. La synthèse est la création d'un tout dont on donne les éléments ; l'analyse est la disjonction d'un tout en ses divers éléments.

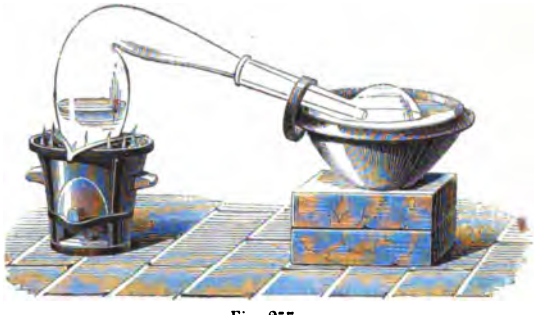


Fig. 277.

L'acide azotique se prépare en chauffant de l'azotate de potasse avec l'acide sulfurique concentré ; l'acide azotique vient se condenser dans un ballon refroidi. Il faut deux équivalents d'acide sulfurique pour un d'azotate, car c'est toujours un bisulfate qui tend à se former, voici la réaction :

$$2(So^3,Ho) + AzO^5,Ko = Ko,Ho,2So^3 + AzO^5,Ho \text{ (}\textit{fig.}\text{ 277).}$$

En prenant les équivalents et les transportant dans cette équation, on voit qu'il

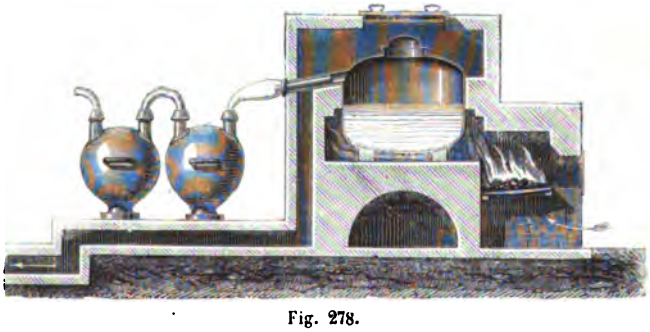


Fig. 278.

faut employer à peu près des poids égaux d'acide sulfurique et d'azotate. Au commencement de l'opération paraissent des vapeurs rutilantes dues à ce que l'acide sulfurique, très-avide d'eau, tend à déshydrater les premières parcelles

d'acide azotique et par suite à le décomposer; ces vapeurs reparaissent à la fin, parce qu'on élève la température.

Dans l'industrie, on place le mélange au milieu d'un fourneau dans des marmites en fonte, et l'acide se condense dans des bonbonnes en grès (*fig.* 278).

L'acide obtenu renferme de l'acide sulfurique entraîné que l'on précipite à l'état de sulfate de baryte en ajoutant de l'azotate de baryte; puis on le distille.

On substitue souvent à l'azotate de potasse l'azotate de soude qui est moins cher, et qui, à poids égal, donne plus d'acide puisqu'il a un équivalent moins élevé.

En temps d'orage, sous l'influence de l'électricité atmosphérique, il se forme de l'acide azotique auquel on attribue la production des azotates naturels.

On emploie chaque année en France plusieurs millions de kilogrammes d'acide azotique, pour préparer l'acide sulfurique et d'autres produits, et pour graver sur les métaux que l'acide azotique dissout.

On donne encore à l'acide azotique le nom d'acide nitrique, parce que c'est avec le nitre ou salpêtre qu'on le prépare.

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DU SOUFRE

Acide hyposulfureux (S^2O^2). — On ne le connaît qu'en combinaison avec des bases. L'hyposulfite de soude est très-employé en photographie. On le prépare par l'action du soufre sur le sulfite de soude.

$$So^2NaO + S = S^2O^2,NaO.$$

A côté de cet acide, se rangent quatre autres acides formant ce qu'on appelle la série thionique et qui ont pour formules S^2O^5, S^3O^5, S^4O^5, S^5O^5.

Acide sulfureux (So^2). — C'est un gaz incolore, dont l'odeur est bien connue par celle des allumettes soufrées que l'on enflamme, densité = 2,2 ; il est acide et rougit la teinture de tournesol pour la décolorer ensuite.

Il se liquéfie à — 12°, et il est facile de l'obtenir liquide en faisant arriver le gaz sulfureux dans un ballon placé au milieu d'un mélange réfrigérant. En revenant à l'état gazeux, ce liquide absorbe une grande quantité de chaleur et produit un refroidissement qui peut aller jusqu'à — 68°.

L'acide sulfureux se forme à toutes les températures et n'est pas décomposable par la chaleur.

L'acide sulfureux est décomposé à chaux par l'hydrogène qui donne de l'eau avec dépôt de soufre, et par le carbone qui donne de l'acide carbonique et du sulfure de carbone.

Le chlore, à la lumière solaire, se combine à l'acide sulfureux pour former un liquide suffocant, l'acide chlorosulfurique So^2Cl, que l'eau décompose en acides chlorhydrique et sulfurique.

Préparation. — 1° Chauffer dans une cornue en terre de la fleur de soufre avec du bioxyde de manganèse

$$MnO^2 + 2S = MnS + SO^2.$$

2° Désoxyder l'acide sulfurique par un métal, le mercure, ou la tournure de cuivre, l'opération se fait avec l'appareil que représente la figure 280, et voici la réaction :

$$Hg + 2(So^3,Ho) = HgOSO^3 + So^2 + 2Ho.$$

Un litre d'eau dissout 50 litres d'acide sulfureux ; on se sert pour préparer

cette dissolution de l'appareil de Woolf, dont les flacons sont remplis d'eau récemment bouillie. Le premier flacon est un flacon laveur rempli d'eau et destiné

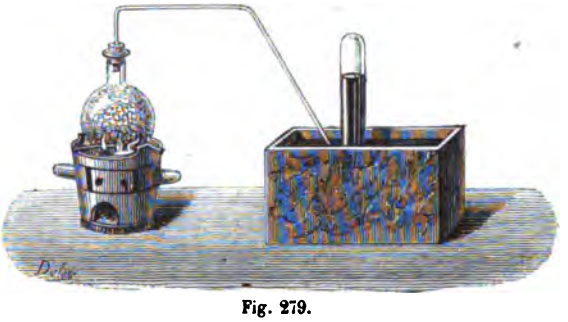


Fig. 279.

à arrêter l'acide sulfurique entraîné. La dissolution d'acide sulfureux s'altère rapidement à l'air, et se transforme en acide sulfurique faible (*fig.* 280).

L'acide sulfureux décolore les matières organiques, par exemple les roses, les violettes, le vin; mais la couleur n'est que masquée, et il est facile de la faire

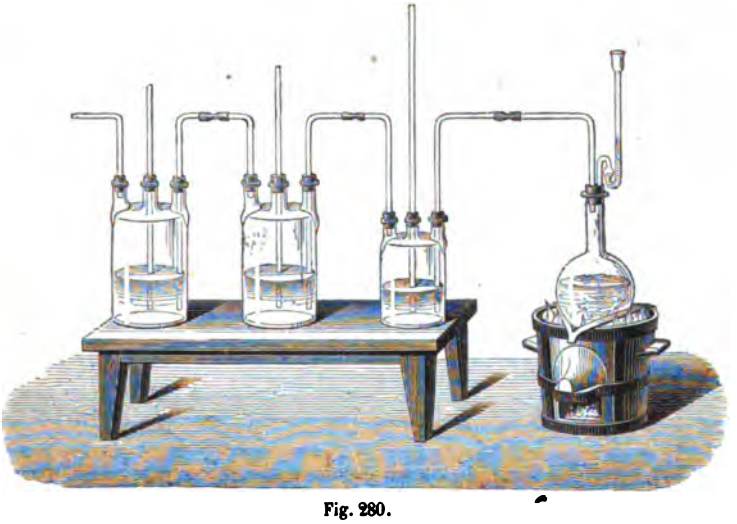


Fig. 280.

reparaître en plongeant les objets dans une eau légèrement alcaline. On l'emploie au blanchiment de la laine et de la soie, en faisant brûler du soufre sur le sol des pièces où les fils sont suspendus; il est préférable au chlore qui altère profondément les étoffes. L'acide sulfureux est encore employé à la guérison des maladies de la peau.

Acide sulfurique (SO^3).— *Acide anhydre.*— Faites passer un mélange d'acide sulfureux et d'oxygène dans un tube contenant de la mousse de platine, échauffée à 300°, et vous pourrez condenser dans un tube en V refroidi l'acide sulfurique anhydre.

La mousse de platine agit par sa présence seule, et n'entre dans la réaction que pour un effet physique encore inexpliqué.

Acide fumant de Nordhausen. — Les pyrites de fer ou sulfures de fer, gril-

lées à l'air s'oxydent et deviennent sulfates; c'est par ce moyen qu'on obtient le sulfate de fer FeO, SO^3 + 7HO, que l'on trouve dans le commerce. On dessèche ce sel, sans arriver toutefois à lui enlever toute l'eau qu'il renferme, puis on le chauffe au rouge sombre dans des cornues de terre ; on recueille dans un récipient refroidi, un acide fumant, très-avide d'eau, qu'on appelle acide fumant de Nordhausen et qui jouit de la propriété de dissoudre facilement l'indigo. Dans la cornue, il reste de l'oxyde rouge de fer, ou colcothar.

Acide hydraté. — C'est un liquide incolore, oléagineux (on l'appelait autrefois huile de vitriol parce qu'on le retirait des sulfates métalliques appelés vitriols), densité = 1,84 — point d'ébullition 325°. — A la température ordinaire, il n'émet pas de vapeur et se congèle à — 35°.

C'est un acide des plus énergiques, fixe et indécomposable, il déplace de leurs combinaisons presque tous les autres acides, et toutefois à une température élevée, il serait lui-même déplacé par l'acide phosphorique.

L'acide sulfurique est très-avide d'eau : une goutte d'eau qui tombe dans un vase plein de cet acide produit le bruit du fer rouge trempé dans l'eau, elle éclate et projette de tous côtés des gouttelettes d'acide ; ce mode d'opérer pourrait être dangereux, aussi faut-il pour mélanger de l'eau et de l'acide sulfurique verser ce dernier dans l'eau ; l'acide étant le plus lourd se rend au fond du vase et il n'y a rien à craindre.

Au contact de l'air, l'acide sulfurique en absorbe la vapeur et augmente de volume.

Un morceau de bois plongé dans cet acide noircit immédiatement, il y a déshydratation et par suite carbonisation ; c'est ce qui explique la couleur jaune sale de l'acide sulfurique mal conservé, il a carbonisé toutes les particules organiques qui se sont mêlées à lui.

L'acide sulfurique forme avec l'eau une véritable combinaison accompagnée d'un développement de chaleur ; mêlez de l'acide concentré avec un peu de glace, la glace fond et il y a dégagement de chaleur; cependant, la glace pour fondre, a besoin d'absorber beaucoup de chaleur, et il y a là un effet physique corrélatif de l'effet chimique. S'il y a peu de glace, l'effet chimique l'emporte et il y a échauffement de la masse ; s'il y a beaucoup de glace, l'effet physique est le plus fort, il y a refroidissement et l'on obtient un mélange réfrigérant ;

4 d'acide sulfurique et 1 de glace donnent une température de 90° ;
1 d'acide — et 4 — — — 20°

L'acide sulfurique ordinaire est un monohydrate SO^3,HO ; on connaît deux autres hydrates. Dans le mélange de l'eau et de l'acide sulfurique il y a contraction, et il est nécessaire, pour avoir le volume d'acide pur contenu dans un acide du commerce, de recourir à un aréomètre construit d'après les principes qui ont servi à construire l'alcoomètre de Gay-Lussac.

Préparation de l'acide du commerce. — L'acide sulfurique ordinaire se prépare en mettant en présence de l'acide sulfureux SO^2, de la vapeur d'eau HO et de l'acide azotique (AzO^5) en petite quantité. Voici comme on peut concevoir les réactions successives :

1° L'acide sulfureux enlève à l'acide azotique une molécule d'oxygène ;

$$AzO^5,Ho + So^2 = So^3,Ho + AzO^4 ;$$

et en effet, l'acide azotique bouillant dans lequel on fait passer un courant

d'acide sulfureux dégage des vapeurs rouges d'acide hypoazotique, et il reste dans la liqueur de l'acide sulfurique que l'on peut précipiter à l'état de sulfate de baryte par l'azotate de baryte.

2° L'acide hypoazotique en présence d'un excès de vapeur d'eau se décompose et donne de l'acide azotique et du bioxyde d'azote :

$$3AzO^4 + nHo = 2AzO^5,nHO + AzO^2.$$

En effet, quelques gouttes d'acide hypoazotique qu'on fait passer dans une éprouvette pleine d'eau sont absorbées et il se dégage un gaz incolore qui s'amasse au sommet de l'éprouvette et qui à l'air se transforme en vapeurs rutilantes. De plus, la liqueur de l'éprouvette est devenue acide.

3° Le bioxyde d'azote s'oxyde à l'air et devient acide hypoazotique

$$AzO^2 + 2O = AzO^4.$$

4° Enfin, cet acide hypoazotique reproduit une nouvelle dose d'acide azotique, comme nous l'avons vu à la réaction (2°).

Dans tout cela, on voit que l'acide azotique est constamment décomposé et constamment régénéré ; la même quantité pourrait donc en théorie servir indéfiniment ; en pratique, il y a des pertes qu'il faut réparer.

Dans les cours, pour démontrer la préparation de l'acide sulfurique, on se sert de l'appareil suivant : Un grand ballon de verre communique avec un flacon où se prépare du bioxyde d'azote, et avec un ballon où se prépare de l'acide sulfureux ; il y a de l'eau dans le fond du ballon. On voit l'atmosphère rougir, puis se

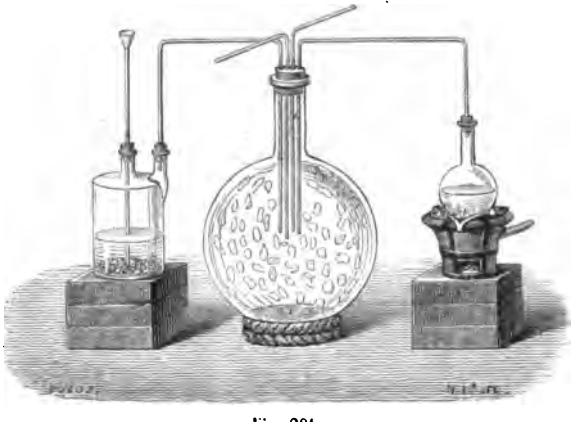


Fig. 281.

décolorer et un liquide huileux coule le long des parois, c'est de l'acide sulfurique. Presque toujours aussi on voit se développer des cristaux, qui sont une combinaison d'acide azoteux et d'acide sulfurique, $AzO^5\,2SO^3$; et qui sont une cause d'impureté pour l'acide en même temps qu'une cause de perte considérable pour le fabricant puisqu'ils absorbent de l'acide azotique.

Dans l'industrie, on se sert de l'appareil connu sous le nom de chambre de plomb ; sur la grille d'un fourneau, on brûle du soufre et l'acide sulfureux produit passe dans une série de chambres garnies de feuilles de plomb ; ces chambres sont généralement au nombre de cinq et celle du milieu peut

avoir 1,000 à 1,200 mètres cubes de capacité; dans une de ces chambres, on produit une sorte de cascade d'acide azotique; le soufre en brûlant échauffe des chaudières pleines d'eau qui par une série de conduits envoient de la vapeur d'eau dans toutes les chambres. L'acide sulfurique se dépose au fond des chambres et on le recueille ; on n'a pu jusqu'ici éviter la production fort gênante des cristaux cités plus haut, qu'on appelle cristaux des chambres de plomb.

Purification. — L'acide ainsi préparé renferme des vapeurs nitreuses qui disparaissent en le chauffant avec du sulfate d'ammoniaque; celui-ci se décompose et l'ammoniaque donne avec les produits nitreux de l'eau et de l'azote.

Il renferme en outre du sulfate de plomb : on précipite le plomb à l'état de sulfure noir de plomb par un courant d'acide sulfhydrique.

On chasse ensuite l'excès de gaz restant au moyen de la distillation : il y a pour cette distillation des précautions à prendre, l'acide sulfurique par sa viscosité a une grande adhérence sur lui-même et sur le vase qui le renferme, les bulles qui se forment au fond du vase ne s'en détachent que lorsqu'elles possèdent une tension supérieure à celle de l'atmosphère, et à ce moment elles soulèvent et projettent la colonne liquide qui les surmonte.

Pour distiller l'acide sulfurique, il faut donc se servir d'une grille annulaire,

Fig. 282.

de manière à chauffer les parois latérales de la cornue : de la sorte, on ne casse pas la cornue et on n'a pas d'accidents à craindre.

On fabrique en France annuellement 70 millions de kilogrammes d'acide sulfurique. On fabrique avec lui les aluns et les sulfates alcalins ou métalliques ; il sert à préparer tous les autres acides; nous verrons qu'on l'emploie dans les fermentations industrielles, etc.

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DU CHLORE

Acide hypochloreux. ClO. — Dans une dissolution de potasse étendue, on fait arriver un faible courant de chlore et l'on évite de laisser la température s'élever; on obtient un mélange appelé eau de Javel et qui est formé de chlorure de potassium et d'hypochlorite de potasse.

$$2Ko + 2Cl = KCl + Ko,ClO.$$

Si l'on remplace la potasse par une base faible, par exemple de l'oxyde rouge de mercure en poudre que l'on agite dans un ballon plein de chlore, il ne se forme plus d'hypochlorite et l'acide hypochloreux gazeux prend dans le ballon la place du chlore ; l'atmosphère intérieure de verte devient incolore. Ce gaz est

très-soluble dans l'eau et possède des propriétés oxydantes et décolorantes très-énergiques.

Acide chloreux (ClO^3). — Gaz jaune foncé, très-lourd, d'une odeur analogue au chlore.

Acide hypochlorique (ClO^4). — Gaz plus jaune que le précédent, très-lourd, se décompose très-facilement en détonant. Dangereux à manier.

Acide chlorique (ClO^5 HO). — Dans une dissolution concentrée de potasse caustique on fait passer du chlore en excès, ce n'est plus de l'hypochlorite, mais du chlorate qui se forme :

$$6Ko + 6Cl = Ko,ClO^5 + Kcl.$$

On décompose le chlorate de potasse par l'acide hydro-fluosilicique qui forme avec la potasse une gelée blanche presque transparente et insoluble.

Concentré dans le vide, c'est un liquide onctueux, soluble dans l'eau en toutes proportions, doué d'une très-grande instabilité. Sous la moindre influence, il cède son oxygène et oxyde les corps en présence ; c'est ainsi qu'il enflamme le papier sec, l'alcool, le soufre, il est décomposé par les acides sulfhydrique, sulfureux et chlorhydrique.

$$\begin{cases} ClO^5 + 5HS = 5Ho + Cl + 5S \\ ClO^5 + 5So^2 = 5So^3 + Cl \\ ClO^5 + 5HCl = 5Ho + 6Cl. \end{cases}$$

Acide perchlorique (ClO^7).— Il est plus stable que le précédent. Le chlorate de potasse légèrement chauffé dégage de l'oxygène, puis la masse s'épaissit et l'on a du perchlorate de potasse, qui, porté à une température plus élevée, se décompose complétement en oxygène et chlorure de potassium. En traitant par l'eau bouillante le mélange de chlorure de potassium et de perchlorate qui résulte d'une ébullition ménagée du chlorate de potasse, on dissout les deux sels et le perchlorate se dépose seul par le refroidissement sous la forme cristalline. On décompose le perchlorate par l'acide sulfurique, et l'on obtient l'acide ClO^7.

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DU PHOSPHORE

Acide hypophosphoreux (PhO). — Lorsqu'on fait bouillir le phosphore avec une dissolution alcaline de potasse, soude ou baryte, l'eau est décomposée, et il se forme un hypophosphite et en même temps de l'hydrogène phosphoré.

L'acide hypophosphoreux PhO est visqueux, incolore, facilement décomposable, très-avide d'oxygène; il réduit l'acide sulfurique.

Fig. 2-3.

Acide phosphoreux (PHO^3). — Se produit par la combustion lente du phosphore à une basse température.

Sous une cloche mouillée à l'intérieur, on place dans le goulot d'un flacon un entonnoir garni de tubes en verre contenant chacun un bâton de phosphore humide. Le liquide recueilli, renferme l'acide phosphoreux en dissolution. C'est un corps très-avide d'oxygène, et par suite très-réducteur.

Acide phosphorique, PHO^5. — L'acide anhydre se prépare par la combustion

du phosphore à l'air. Dans une cloche on plonge un tube fermé par un bouchon à la partie supérieure et qui débouche au-dessus d'une capsule de terre, par ce tube on fait tomber des fragments de phosphore, on allume le premier fragment avec un fil de fer rougi. A droite de la cloche on voit un tube vertical rempli de

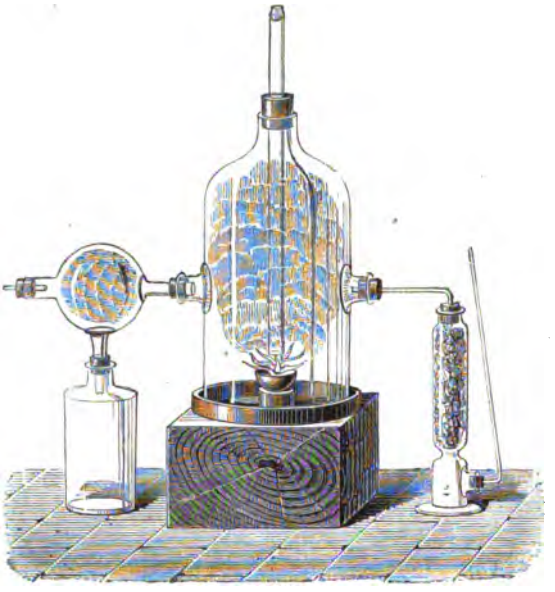


Fig. 284.

chlorure de calcium qui dessèche l'air qu'on envoie avec un soufflet dans ce tube. Il se produit d'abondantes fumées blanches d'acide phosphorique qu'on recueille dans la cloche et dans le flacon placé à gauche de la cloche.

C'est une matière blanche, neigeuse, déliquescente à l'air dont elle absorbe l'humidité, se dissolvant dans l'eau avec le bruit du fer rouge trempé. L'acide une fois hydraté, on ne peut plus lui enlever son eau.

Il y a trois acides phosphoriques hydratés (PhO^5,HO), (PhO^5,2HO), (PhO^5,3HO), qui sont réellement trois acides distincts. Nous avons vu que l'acide azotique formait deux hydrates AZO^5, HO et AZO^5 4HO; ces hydrates mis en présence d'une base MO ne donnent qu'un sel AZO^5, MO. Il n'en est pas de même avec les hydrates l'acide phosphorique, l'eau y joue réellement le rôle de base :

L'acide métaphosphorique Pho^5,Ho donne une série de sels Pho^5,Mo
L'acide pyrophosphorique Pho^5,2Ho donne deux séries de sels Pho^5,2Mo, et Pho^5,Mo,Ho
L'acide phosphorique Pho^5,3Ho donne trois séries de sels (Pho^5,3Mo) (Pho^5,2Mo,Ho) (Pho^5,Mo,2Ho).

Ces trois états particuliers de l'acide phosphorique constituent donc en réalité trois acides distincts, ainsi qu'on le voit aux réactions suivantes :

Pho^5,Ho — précipite l'albumine.	Précip. blanc avec l'azotate d'argent.	Précip. blanc avec BaCl.
Pho^5,2Ho — ne la précipite pas.	Précipité blanc —	Pas de précipité.
Pho^5,3Ho — ne la précipite pas.	Précipité jaune —	Pas de précipité.

Par la chaleur, ces trois acides sont ramenés à l'état d'acide métaphosphorique,

qui est indécomposable par la chaleur seule et chasse tous les autres acides de leurs composés.

L'acide ordinaire PhO^5, 3HO s'obtient en décomposant par l'eau le perchlorure de phosphore $PhCl^5$ et chauffant pour chasser l'acide chlorhydrique

$$PhCl^5 + 8Ho = Pho^5, 3Ho + 5HCl.$$

Le plus souvent on le prépare en faisant bouillir des fragments de phosphore avec l'acide azotique, qui cède son oxygène au phosphore. Au commencement il

Fig. 285.

passe à la distillation de l'acide azotique; pour l'utiliser, on reverse dans la cornue le liquide condensé dans le ballon. On condense par la chaleur jusqu'à ce qu'on obtienne un liquide sirupeux.

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DU CARBONE

Oxyde de carbone (CO). — C'est un gaz neutre, incolore, inodore, insipide, peu soluble dans l'eau, brûlant à l'air avec une flamme bleue et se transformant alors en acide carbonique CO^2. Ce gaz est indécomposable à la chaleur et à l'électricité, densité 0,967. On ne l'a pas liquéfié jusqu'à présent. L'oxyde de carbone est très-délétère, et une atmosphère qui en renferme plus de $\frac{1}{100}$ de son volume empoisonne rapidement les êtres vivants. Au contraire, l'acide carbonique n'est pas un poison, il asphyxie, parce qu'il n'entretient pas la respiration, mais il ne détruit pas l'organisme, et un animal peut très-bien vivre dans une atmosphère qui contient $\frac{25}{100}$ de son volume d'acide carbonique.

L'oxyde de carbone se produit toutes les fois que la combustion du charbon est incomplète, c'est-à-dire qu'une grande masse de charbon reçoit trop peu d'air. Nous avons vu cet effet se produire en étudiant la constitution de la flamme d'une bougie.

L'oxyde de carbone tend à se transformer en acide carbonique, aussi est-il employé en métallurgie pour réduire les oxydes.

Préparation. — On peut le préparer en faisant passer un courant d'air sur du charbon porté au rouge dans un tube, ou bien en chauffant un excès de charbon avec un oxyde difficile à réduire tel que l'oxyde de zinc. Dans les laboratoires on le prépare en décomposant l'acide oxalique par l'acide sulfurique concentré : on place le mélange des deux acides dans un ballon muni d'un tube de sûreté;

le gaz se rend dans un flacon laveur à la potasse qui retient l'acide carbonique, et l'oxyde de carbone est recueilli sur la cuve à eau. L'acide oxalique est formé

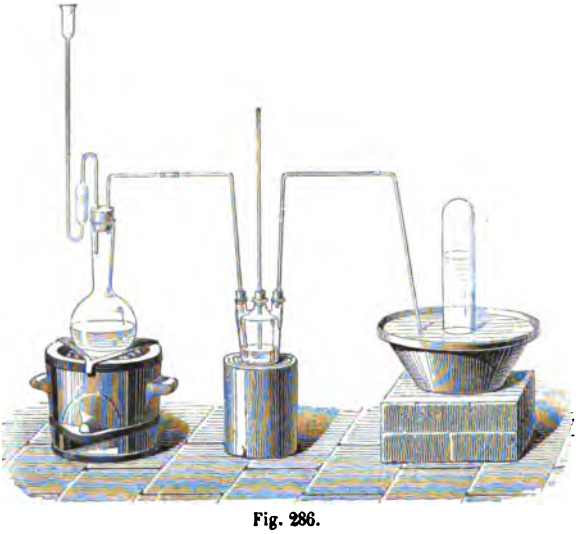


Fig. 286.

par le radical C^2O^3 combiné avec de l'eau, et lorsque l'eau est enlevée à la combinaison par l'acide sulfurique, le radical C^2O^3 est isolé; et comme il n'existe pas

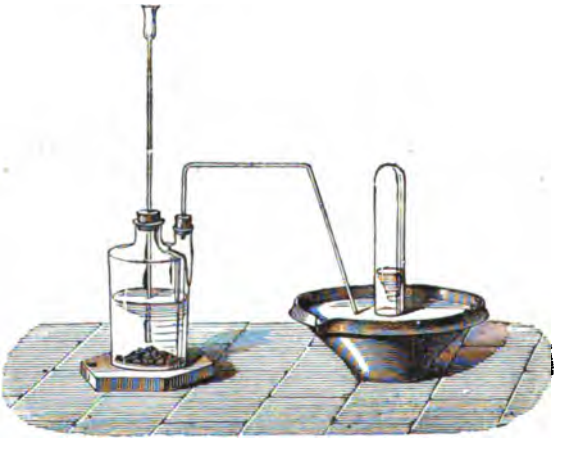


Fig. 287.

à l'état anhydre, il se dédouble en $CO^2 + CO = C^2O^3$. L'acide carbonique est absorbé par la potasse, et l'oxyde de carbone se dégage.

Acide carbonique (CO^2). — Le charbon brûlant dans l'oxygène se transforme en gaz acide carbonique; ce même gaz se produit en grande quantité dans tous nos appareils de chauffage, et les animaux en exhalent par leur respiration. Les carbonates métalliques et surtout le carbonate de chaux entrent pour une grosse part dans la constitution de l'écorce terrestre.

On le prépare en faisant agir l'acide chlorhydrique sur du marbre ou de la craie, il se forme de l'eau et du chlorure de calcium, composé éminemment soluble et l'acide se dégage.

$$CaO,Co^2 + HCl = Ho + CaCl + Co^2.$$

Il faut avoir soin de verser peu à peu l'acide chlorhydrique dans le flacon pour éviter un dégagement tumultueux.

C'est un gaz incolore, de saveur aigre et piquante, mais agréable, il colore la teinture de tournesol en rouge vineux, c'est donc un acide faible, car les acides énergiques colorent le tournesol en rouge pelure d'oignon, densité 1,53. Il est donc beaucoup plus lourd que l'air et s'accumule dans les parties basses de l'atmosphère ; c'est ainsi que dans la grotte du Chien, près de Naples, un homme debout peut s'avancer sans être incommodé, tandis que les chiens ne peuvent respirer et tombent asphyxiés, parce qu'ils sont plongés dans la zone d'acide carbonique.

Ce même gaz carbonique se dégage en grande quantité dans les fermentations alcooliques, et n'est pas sans occasionner quelques asphyxies, chez les vignerons, les brasseurs, etc. Quand une atmosphère en est trop remplie, il faut la balayer par un fort courant d'air ou absorber le gaz par des dissolutions alcalines de potasse et de soude ou par un lait de chaux.

Soumis à une pression de 36 atmosphères à 0°, le gaz carbonique se liquéfie. L'expérience se fait dans l'appareil de Thilorier : dans un cylindre vertical mobile autour d'un axe horizontal on place du bicarbonate de soude, et dans un

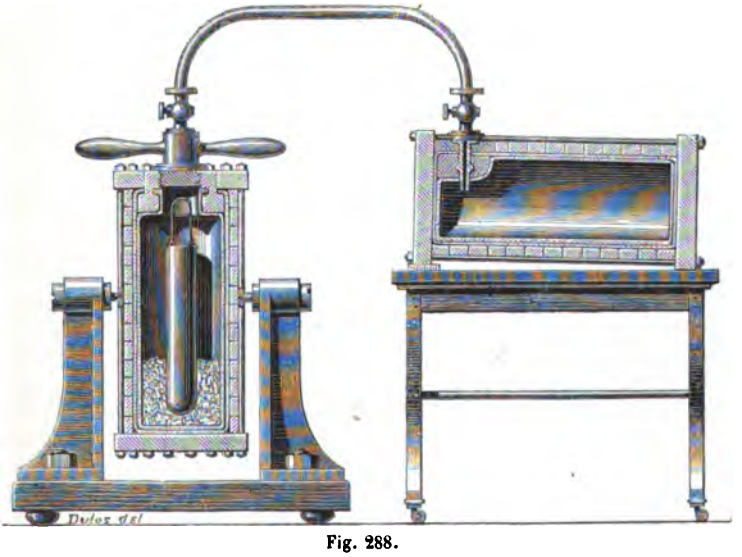


Fig. 288.

tube vertical intérieur de l'acide sulfurique concentré. On ferme solidement le couvercle à vis, et l'on imprime au cylindre un mouvement de rotation autour de son axe : la réaction est faite, et alors on établit la communication avec un cylindre horizontal où se rend le gaz et où il se condense par sa propre pression. Il faut construire des cylindres résistants si l'on ne veut risquer sa vie dans une explosion formidable.

L'acide carbonique liquide est très-fluide, très-dilatable; évaporé à l'air libre, il produit un refroidissement qui va jusqu'à 80°. Si, par un petit tube, on le laisse s'échapper de l'appareil précédent dans l'air, il y a tant de chaleur absorbée qu'une partie de l'acide carbonique se solidifie en neige, très-peu conductrice et par suite facile à conserver quelque temps à l'air. L'acide solide se dissout dans l'éther et produit alors le froid le plus intense que l'on connaisse, qui peut aller dans le vide jusqu'à 110° au-dessous de 0°.

L'acide carbonique est soluble dans l'eau à volume égal; et la quantité de gaz dissous est proportionnelle à la pression. Sous une pression de quinze atmosphères, on dissoudra quinze litres d'acide carbonique dans un litre d'eau. On constitue de la sorte une eau gazeuse qui, mise en contact avec l'air libre, bouillonne et dégage des bulles d'acide carbonique.

L'acide carbonique qui passe sur du charbon porté au rouge est décomposé et ramené à l'état d'oxyde de carbone; c'est le phénomène qui se passe dans les hauts fourneaux.

Les eaux chargées d'acide carbonique dissolvent plus facilement certains minéraux, surtout les carbonates; il semble qu'il se forme des bicarbonates solubles.

Acide borique (BoO^3). — L'acide borique est un solide prismatique, incolore s'il est pur. Il renferme trois équivalents d'eau; il en perd deux à 100° et le troisième au rouge.

Il fond au rouge cerise, et prend alors l'aspect et les propriétés du verre fondu; il est facile de l'étirer en fils minces. L'acide borique se volatilise dans un courant de vapeur.

Les borates sont des verres colorés. Le borate de cobalt est bleu violet, celui de cuivre bleu verdâtre, celui d'oxyde de manganèse est améthyste. Les oxydes métalliques sont solubles dans l'acide borique à de hautes températures et, si le refroidissement est lent, ces oxydes peuvent cristalliser; c'est ainsi qu'en dissolvant l'alumine dans l'acide borique et laissant pendant longtemps le mélange dans les fours à porcelaines, Ebelmen, directeur de la manufacture de Sèvres arriva à reproduire le corindon, pierre précieuse de la nature. Il obtint de même le spinelle, par un mélange d'alumine et de magnésie.

L'acide borique dissous dans l'alcool communique à la flamme de ce liquide une couleur verte toute particulière.

Préparation. — On trouve dans certains lacs desséchés des pays chauds, du borax ou borate de soude, qui, traité dans l'eau bouillante par l'acide chlorhydrique, abandonne par refroidissement des cristaux d'acide borique.

Mais on trouve plus simplement l'acide borique dans les *suffioni* de Toscane. Les suffioni sont des jets de vapeur qui jaillissent de crevasses du sol et qui tiennent l'acide borique en suspension; cette vapeur se condense et on la recueille dans une série de bassins où la dissolution d'acide borique se condense de plus en plus; par refroidissement, on obtient des cristaux d'acide borique.

Acide silicique ou silice (SiO^3). — La silice se présente dans la nature sous de nombreuses formes que l'on peut rapporter à deux genres:

1° Genre quartz, comprenant toutes les variétés cristallisées ou transparentes telles que le quartz ou cristal de roche, blanc ou coloré, l'agate, l'opale, etc.;

2° Genre silex contenant toutes les variétés qui sont opaques, ou qui le deviennent par la chaleur, probablement à la suite d'une perte d'eau, telles sont la pierre à fusil, la meulière, etc.

La silice à l'état libre se rencontre dans les geysers d'Irlande, jets naturels d'eau chaude et de vapeurs.

Elle constitue bon nombre de roches en s'unissant aux oxydes métalliques ; elle entre en grande proportion dans les argiles. Enfin on la trouve dans la tige des céréales, à laquelle elle donne de la rigidité.

La silice anhydre est une poudre blanche, incolore, insipide, insoluble dans tous les liquides excepté dans l'acide fluorhydrique, infusible si ce n'est entre les charbons d'une forte pile.

Elle est décomposable par un mélange de chlore et de carbone, et donne de l'oxyde de carbone avec du chlorure de silicium ; le fer l'attaque aussi en présence du charbon, et il se forme une siliciure de fer.

Les acides les plus faibles précipitent l'acide silicique des silicates solubles ; en effet la silice est un acide très-faible, qui rougit à peine la teinture de tournesol ; mais, à cause de sa fixité, elle peut, à de hautes températures, déplacer les acides énergiques.

Si l'on chauffe, à une température très-élevée, du sable blanc avec de la potasse caustique et du carbonate de potasse en excès, et qu'on reprenne par l'eau, on obtient ce qu'on appelle la liqueur des cailloux qui renferme un silicate de potasse en dissolution. Si l'on verse peu à peu de l'acide chlorhydrique dans cette liqueur, on précipite la silice sous la forme d'une gelée blanchâtre. C'est un hydrate de silice qui, desséché dans le vide, se transforme en l'hydrate simple SiO^3,HO. — A 100°, ce composé perd la moitié de son eau et devient $2SiO^3$,HO. — L'opale est un hydrate naturel de silice.

COMPOSÉS HYDROGÉNÉS DES MÉTALLOÏDES

L'eau (HO). — Protoxyde d'hydrogène.

Nous avons tous vu l'eau affecter les trois états : solide, liquide, gazeux, dans des limites restreintes de température. Nous avons étudié en physique la plupart des propriétés usuelles de l'eau, sa congélation, sa dilatation, sa vaporisation, sa tension de vapeur, etc. ; nous n'y reviendrons pas.

L'eau se congèle à 0°, toutefois, dans un milieu tranquille, elle peut se maintenir à l'état liquide jusqu'à — 12°. — Sa chaleur latente de fusion est de 79 calories. — Son maximum de contraction est à 4°, c'est pourquoi la glace flotte sur l'eau. — Comme le bismuth, l'eau augmente de volume en se congelant.

L'eau pure est incolore, et bleu clair sous de grandes épaisseurs ; quand elle n'est pas pure, elle prend d'autres teintes.

L'eau dissout les solides et, sauf quelques exceptions, la solubilité croît avec la température.

Elle dissout les gaz, mais les abandonne quand la température s'élève : 1° Chaque gaz à 0° et sous la pression 0,76 a son coefficient propre de dissolution ; 2° les quantités de gaz dissoutes sont proportionnelles à la pression exercée par le gaz sur le liquide ; 3° dans un mélange de gaz, chaque gaz est dissous comme s'il était seul et occupait tout l'espace du mélange. L'eau pure n'a pas de saveur : mais toutes les eaux naturelles ont une saveur plus ou moins agréable suivant les gaz et les matières de toutes espèces qu'elles tiennent en dissolution.

La physique nous a appris qu'il fallait environ 540 calories pour faire passer 1 gramme d'eau de l'état liquide à l'état de vapeur.

L'eau comprimée ne bout plus à 100° : l'ébullition a lieu à des températures variables, comme nous l'avons vu en physique.

Composition de l'eau. — L'eau résulte de l'union de l'hydrogène avec l'oxygène ; nous l'avons déjà constaté. Une expérience bien simple, due à Cavendish, le prouve : préparez de l'hydrogène avec le flacon habituel et desséchez le

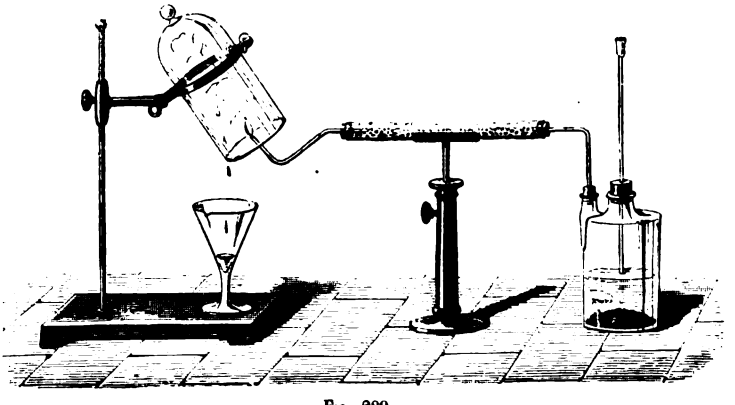


Fig. 289.

gaz en lui faisant traverser un tube rempli de chlorure de calcium ; enflammez le gaz à sa sortie, et au-dessus du jet placez une cloche : vous verrez les parois de la cloche se couvrir d'une buée, puis de gouttelettes d'eau qui s'amasseront et qu'on pourra recueillir dans un verre.

Plusieurs expériences de Lavoisier vinrent ensuite pour montrer que l'eau était bien une combinaison d'oxygène et d'hydrogène.

Fig. 290.

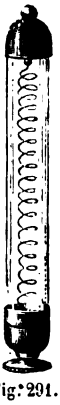


Fig. 291.

Enfin en 1800, Carlisle et Nicholson firent l'analyse de l'eau en la décomposant par la pile : au-dessus des pôles positif et négatif d'une pile, on place des tubes égaux et l'on ferme le courant, l'eau est décomposée : au pôle positif on recueille un volume de gaz moitié plus petit que le volume recueilli au pôle négatif, ce dernier est de l'hydrogène, le premier est de l'oxygène, comme il est facile de le reconnaître à leurs propriétés. Ainsi l'eau est formée de 2 volumes d'hydrogène et de 1 vol. d'oxygène.

Si avec l'électricité dynamique, on décompose l'eau, on peut la recomposer, c'est-à-dire en faire la synthèse, avec l'étincelle électrique. Dans le tube appelé eudiomètre, rempli d'eau et placé sur la cuve à eau, on fait passer, au moyen d'une mesure spéciale, deux volumes d'hydrogène et un volume d'oxygène ; dans le tube s'élève un fil métallique tordu en spirale, terminé par une boule et relié à l'armature inférieure du tube ; l'armature supérieure est traversée par une tige métallique terminée par un bouton et isolée de l'enveloppe métallique. Entre les deux boules on fait jaillir l'étincelle et les gaz disparaissent ; l'air rentre

brusquement dans la cloche. Si l'on a mis les deux gaz en proportions qui diffèrent de $\frac{1}{4}$, il y a un résidu d'oxygène ou d'hydrogène facile à constater. L'eudiomètre à eau présente un inconvénient en ce sens que l'eau ordinaire renferme de l'air qui se dégage au moment où le vide se produit après l'explosion, tandis que l'eau distillée, au contraire, absorbe l'oxygène du mélange. Aussi recourt-on, pour plus d'exactitude, à l'eudiomètre à mercure.

Méthode et appareil de M. Dumas. — Le dosage en poids est toujours le plus exact, c'est celui qu'a employé M. Dumas ; il fait arriver un courant d'hydrogène sec sur de l'oxyde de cuivre, lequel est réduit, abandonne son oxygène : l'eau est absorbée par les tubes qui suivent et l'augmentation de poids de ces tubes donne le poids de l'eau formée ; d'autre part, la diminution de poids du tube renfermant l'oxyde de cuivre, donne le poids de l'oxygène entré dans la constitution de l'eau ; on obtient par différence le poids de l'hydrogène. Voici la description de l'appareil (planche 1, figure 2). Dans le flacon de droite on prépare l'hydrogène qui vient se purifier dans une série de tubes renfermant de l'azotate de plomb qui enlève l'acide sulfhydrique, de la potasse qui enlève les carbures d'hydrogène et une partie de l'humidité : enfin deux tubes plongés dans la glace et remplis d'acide phosphorique anhydre, dessèchent complétement le gaz ; le petit tube qui vient à la suite est un tube témoin dont le poids ne doit pas avoir changé après l'opération ; puis vient un ballon en verre résistant où l'on chauffe l'oxyde de cuivre, ensuite un ballon où l'eau se condense, et enfin une série de tubes à acide phosphorique retenant le reste de l'eau. L'air extérieur ne peut pénétrer dans l'appareil.

On trouve ainsi que l'eau renferme en poids

8^{gr} d'oxygène pour 1^{gr} d'hydrogène ; — sa formule est HO ;

passons aux volumes :

La densité de l'hydrogène est 0,0692, donc le poids de deux volumes d'hydrogène sera proportionnel à $2 \times 0{,}0692 = 0{,}1384$.

La densité de l'oxygène étant 1,1057, le poids d'un volume de ce gaz sera proportionnel à 1,1057, nombre 8 fois plus fort que le précédent.

Les densités peuvent faire voir en outre que deux volumes d'hydrogène s'unissent à un volume d'oxygène pour donner deux volumes de vapeur d'eau, car

$2 \times 0{,}0692$ (densité de l'hydrogène) $+ 1{,}1057$ (densité de l'oxygène)

font un total égal à 1,244 (double de la densité 0,622 de la vapeur d'eau).

De l'eau des sources et rivières. — La grande masse liquide qui forme les mers est un foyer d'évaporation continuelle ; les vapeurs entraînées par les vents forment les nuages qui se résolvent en pluie. La pluie dissout les gaz contenus dans l'atmosphère, et, tombée sur le sol, elle rencontre une infinité de sels plus ou moins solubles dont elle se charge ; quelquefois même elle pénètre dans le sol pour en sortir à l'état de source thermale ou minérale.

On peut donc dire que la composition de l'eau est fort complexe : de plus elle a une influence énorme dans le mécanisme de la vie animale et végétale, et cette influence s'étend jusqu'à l'industrie puisque l'eau peut se prêter plus ou moins bien à l'alimentation des chaudières à vapeur.

Quand on veut se procurer de l'eau pure, il faut distiller l'eau ordinaire dans un alambic, appareil dont les deux pièces principales sont la chaudière ou cucurbite dans laquelle on chauffe l'eau, et le serpentin, tube contourné en spirale et enfermé dans une cuve à la partie inférieure de laquelle arrive con-

stamment un filet d'eau froide. La vapeur d'eau se condense; on ne recueille point les premières portions d'eau distillée et on s'arrête lorsque l'eau de la chaudière est réduite aux $\frac{3}{4}$ de son volume.

L'eau distillée ne doit donner aucun résidu lorsqu'on l'évapore sur une plaque de porcelaine; elle ne renferme plus d'air. Elle est alors devenue impropre aux usages domestiques, on ne saurait la digérer.

L'eau potable renferme des gaz nombreux, que l'on peut recueillir en chauffant jusqu'à l'ébullition de l'eau contenue dans un ballon: les gaz se dégagent et on les recueille sur la cuve à mercure, il y a toujours un peu de vapeur d'eau entraînée; elle se condense au-dessus du mercure.

On recueille ainsi dans les eaux ordinaires de l'air qui diffère de l'air ordinaire en ce sens qu'il renferme plus d'oxygène, ce qui devait se prévoir puisque l'oxygène est plus soluble que l'azote. L'eau renferme aussi de l'acide carbonique qui reste en dissolution, et que l'on peut extraire par d'autres procédés.

Les eaux qui viennent de grandes profondeurs, comme celles des puits artésiens ne renferment pas d'oxygène; ce gaz a dû servir à oxyder les minéraux, tels que les sulfures rencontrés par les eaux. Elles sont impropres à l'alimentation, à moins d'être préalablement aérées.

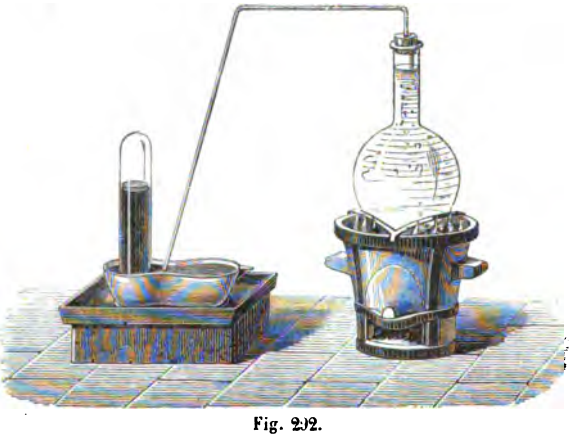


Fig. 292.

L'eau de pluie contient 24 cent. cubes de gaz par litre; une bonne eau potable en renferme 50 centimètres cubes.

Il y a un inconvénient à extraire les gaz de l'eau à l'ébullition, car à cette température l'oxygène peut altérer les matières organiques et disparaître en partie. Pour une expérience délicate, il faudrait mettre le ballon et la cuvette à mercure en communication avec la machine pneumatique et faire un vide partiel, de sorte que l'ébullition descende à 50° environ.

Les matières solides contenues dans l'eau s'obtiennent par évaporation à siccité, dans une capsule de porcelaine, d'une quantité d'eau donnée. Là encore, il est nécessaire de faire l'évaporation dans le vide, car la chaleur détruirait ou modifierait les matières organiques.

Les substances que l'on rencontre ordinairement dans les eaux sont: des carbonates de chaux et de magnésie, des chlorures de magnésium et de sodium, des sulfates de chaux et de soude, des matières organiques, des silicates et de la silice.

Voici d'après M. l'ingénieur en chef Hervé-Mangon le résultat de l'analyse de diverses eaux:

DÉSIGNATION DES EAUX.	MATIÈRES SOLIDES PAR LITRE, EN GRAMMES.											
	SILICE.	ALUMINE.	PEROXYDE DE FER.	CHAUX.	MAGNÉSIE.	SOUDE.	POTASSE.	ACIDE SULFURIQUE.	ACIDE CHLORHYDRIQUE.	ACIDE carbonique combiné.	MATIÈRES organiques et eau combinée.	POIDS TOTAL par litre des résidus solides.
1. — Source des environs d'Orthez (Basses-Pyrénées).. .	0.006	»	»	0.004	0.002	»	0.007	0.002	0.001	0.002	»	0.024
2. — Source d'Argagnon, près d'Orthez..	0.058	0.002	»	0.049	0.005	»	0.020	0.020	0.008	0.033	0.008	0.183
3. — Source à Combes-la-Ville (Seine-et-Marne).. . . .	0.024	0.002	»	0.183	0.015	0.027	0.027	0.079	0.003	0.112	0.109	0.555
4. — Fontaine de la place d'Armes, à la Rochelle. . . .	0.006	»	»	0.181	»	0.026	0.026	0.021	0.036	0.196	»	0.466
5. — Eau de Seine à Bercy, le 17 juillet 1846..	0.024	0.001	0.002	0.103	0.002	0.008	0.002	0.018	0.007	0.074	»	0.254
6. — Eau du puits artésien de Grenelle, 1841..	0.006	»	»	0.038	0.007	»	0.026	0 003	0.006	0.052	0.003	0.143
7. — Eau du Château-d'Eau de Reims, 18 juin 1849. . .	0 002	0.001	0.004	0.092	»	0.002	0.003	0.001	0.005	0.072	0.008	0.191
8. — Eau de la Vilaine, à Redon, 18 août 1846..	0.001	0.001	»	0.001	0.004	0.009	»	0.002	0.006	0.001	0.070	0.100
9. — Eau de la Loire à Nantes, vis-à-vis le Château, 7 juillet 1846. .	0.005	0.004	»	0.033	0.009	0.011	»	0.004	0.007	0.020	0.022	0.147
10. — Eau de l'Erdre, au déversoir de Nantes, 7 juillet 1846.	0.002	0 003	»	0.016	0.010	0.021	»	0.006	0.022	0.012	0 051	0.142
11. — Eau de la Maine à Clisson, le 26 juillet 1846.. . .	0.009	0.007	»	0.015	0.008	0.040	»	0.005	0.023.	0.009	0.041	0.159
12. — Eau du lac de Grand-Lieu, p. Bouaye, 17 juillet 1846.	0.006	0.005	»	0.008	0.003	0.018	»	»	0.013	0.011	0.012	0.077
13. — Eau de la Garonne, à Toulouse, 16 juillet 1846. . .	0.040	»	0.003	0.036	0.001	0.006	0.003	0 007	0.002	0 054	0.004	0.136
14. — Eau du puits de l'École normale de Rhodez, 20 décembre 1849. .	0.006	0.006	»	0.028	0.048	0.016	0.026	0.024	0.042	0.067	0.009	0.441
15. — Eau du Doubs à Besançon, Pont-Rivotte, 17 jan 1845.	0.016	0.002	0.003	0.107	0.001	0.005	0.002	0.003	0.001	0 086	»	0.230
16. — Eau du Rhône à Genève, près des pompes, 30 av. 1846.	0.024	0.004	»	0.063	0.004	0.004	0.002	0.026	0.009	0.058	»	0.182
17. — Eau du Rhône à Lyon, juillet 1835..	»	»	»	0.059	traces	traces	»	0.004	traces	0.044	»	0.107
18. — Eau du Rhône à Lyon, 2 mars 1839	traces	»	»	0.084	0.005	»	»	0.018	traces	0.062	0.007	0.182
19. — Eau du Rhin à Strasbourg, mai 1846..	0.049	0.002	0.006	0.082	0.002	0.009	0.001	0.014	0.001	0.062	»	0.232
20. — Eau de la Toiselle (Cher)..	0 010	0.021	»	0 082	traces	9.017	0;017	0.003	»	0.064	0.007	0.204
21. — Source de Queven (Morbihan).	0.008	0.011	»	0.012	0.002	0.018	0.018	0.006	0.001	0.011	0.008	0.090
22. — Eau prise au milieu du bois de Boulogne, juin 1856.	0.003	0.006	»	0.067	0.003	0.011	0.011	0.017	0.006	0.042	0 054	0.210
23. — Eau prise au milieu de l'étang de Cazeau (Landes), novembre 1858.	0.002	0.001	»	0.006	0.007	0.028	»	0.010	0.030	»	0.008	0.093

stamment ur
point les pr
chaudière
L'eau d
de porce
usages
L'e
faut
et o
en

CHIMIE.

196

Les sels calcaires communiquent aux eaux de fâcheuses propriétés, et constituent ce qu'on appelle les eaux crues, qui sont impropres à l'alimentation des machines à vapeur et aux usages domestiques.

Le plus nuisible est le sulfate de chaux que l'on trouve dans les eaux des puits de Paris, connues sous le nom d'eaux séléniteuses. Avec le savon, le sulfate de chaux donne un savon calcaire insoluble qui se précipite sur l'étoffe en entraînant toutes les impuretés; le même effet se produit sur les mains qui deviennent rugueuses.

Les légumes farineux, haricots, pois, lentilles, etc., renferment un principe organique, la légumine, qui forme avec la chaux un composé insoluble; il en résulte que ces légumes cuits dans des eaux calcaires ou séléniteuses durcissent de plus en plus et ne peuvent servir à l'alimentation.

Dans les chaudières à vapeur, chaque litre d'eau qui passe à l'état de vapeur abandonne quelques grammes de matières plus ou moins solubles. Si ce sont des sels alcalins ou des boues organiques l'inconvénient n'est pas grand, et il suffira de nettoyer la chaudière de temps en temps, ou d'avoir un système d'appareils purgeurs. L'eau de mer toutefois est trop chargée de matières salines pour qu'on puisse l'employer à haute pression; un peu au-dessus de 100°, cette eau se prend en masse gélatineuse et ne saurait être employée. Il est donc nécessaire d'avoir des machines marines à basse pression et, par suite, très-volumineuses et très-pesantes; il faut leur adjoindre des condenseurs qui prennent encore une grande partie de l'espace utile.

Le sulfate de chaux est plus soluble à froid qu'à chaud, et même il se décompose complétement vers 200°, et se dépose en plaques adhérentes et très-dures sur les parois de la chaudière; ces plaques sont amorphes ou cristallisées, suivant que le sulfate a perdu, ou a gardé son eau de cristallisation.

Le sulfate de chaux entraîne avec lui les carbonates de chaux et de magnésie qui s'incorporent dans les plaques et les augmentent d'autant.

Les sels calcaires que l'on rencontre le plus ordinairement sont les carbonates: ils ont, au point de vue des usages domestiques, les mêmes effets que le sulfate; mais ils sont moins dangereux dans l'alimentation des chaudières.

La quantité de carbonate de chaux que l'eau peut dissoudre est très-variable: l'eau pure ne prend guère que 0^{gr},05 de calcaire par litre; mais l'eau chargée d'acide carbonique peut en dissoudre jusqu'à 1 gramme par litre. Il semble que le carbonate ainsi dissous soit à l'état de bicarbonate; ainsi, les calcaires que l'on trouve dans le résidu solide qui provient de l'évaporation de l'eau, appartiennent à deux catégories : 1° les calcaires réellement dissous par l'eau pure, et qui ne tendent pas à se déposer; 2° les calcaires dissous uniquement à la faveur de la présence de l'acide carbonique, et qui se déposent aussitôt que l'acide carbonique disparaît.

Ainsi, lorsqu'une eau renferme plus de 0^{gr},05 de carbonate de chaux par litre, faites-la bouillir, elle perdra son acide carbonique et, par suite, tout l'excès de carbonate qui se précipite en poudre blanche.

Au lieu de la faire bouillir, mettez-la en contact avec des corps solides à forme irrégulière, des branchages, par exemple; agitez-la par un moyen quelconque, vous produirez encore une perte d'acide carbonique et, par suite, un dépôt calcaire. C'est ainsi que les fontaines incrustantes de Sainte-Allyre, en Auvergne, recouvrent d'une couche calcaire tous les objets qu'on y plonge, branchage, nids d'oiseaux, etc. On obtient de la sorte, ce qu'on appelle à tort des pétrifications, ce sont des incrustations.

C'est ainsi que s'expliquent aussi les incrustations que l'on rencontre quelquefois sur les roues hydrauliques, sur les portes d'écluse, etc. La formation des stalactites et des stalagmites dans les cavernes naturelles est due à la même cause : des eaux chargées de calcaire suintent au sommet de la voûte, se réunissent en gouttes, abandonnent le carbonate et, peu à peu, forment deux cônes qui marchent l'un vers l'autre; celui qui est attaché à la voûte est la stalactite, celui qui repose sur le sol verticalement au-dessus de l'autre est la stalagmite; avec les siècles, ces deux cônes se rejoignent pour former des colonnes.

Pour produire des incrustations, il n'est pas nécessaire qu'une eau renferme beaucoup de calcaire; il faut qu'elle ne renferme que juste la proportion d'acide carbonique nécessaire à la dissolution du calcaire; si elle en renferme beaucoup plus, le carbonate de chaux ne se déposera pas et l'eau, quoique très-chargée, pourra ne pas incruster les conduites qui la renferment.

Dans les conduites d'eau, on rencontre, en outre, une matière organique azotée qui, mélangée au carbonate de chaux, forme un enduit très-dur et très-difficile à enlever. Quelquefois, cette matière organique renferme un peu de fer et se dépose dans l'intérieur des tuyaux sous forme de végétations qui finissent par obstruer complétement le passage.

Dans les chaudières à vapeur, les calcaires produisent deux effets différents : le calcaire qui se dépose par le dégagement de l'acide carbonique est à l'état pulvérulent et ne s'attache pas aux parois; il n'a guère d'inconvénient et s'enlève comme les boues. Mais l'autre partie de calcaire dissoute par l'eau pure se dépose, lorsque la concentration de l'eau est suffisante et se dépose en lames adhérentes; la formation de ces lames adhérentes est très-contrariée, lorsqu'il se dépose une certaine quantité de calcaire pulvérulent. Il en résulte qu'il vaut mieux employer une eau un peu chargée de calcaire en excès, qu'une eau renfermant seulement $0^{gr},05$ de calcaire.

Hydrotimétrie. — L'hydrotimétrie est la mesure de la crudité de l'eau. En voici le principe : la dissolution alcoolique de savon produit dans une eau non chargée de sels terreux (calcaires ou magnésiens), une mousse persistante à la surface; au contraire, s'il y a dans l'eau des sels terreux, la mousse ne se produit pas et il se forme des grumeaux insolubles qui sont des savons calcaires.

Ceci posé, on prépare une dissolution titrée de savon, c'est-à-dire que l'on dissout un poids connu de savon dans un volume connu d'alcool à un certain degré. La dissolution faite, on la met dans une burette graduée, et, grâce aux données précédentes, on sait combien une division de la burette contient de savon. On verse goutte à goutte la dissolution de savon dans l'eau qu'on veut essayer, et l'on agite après avoir versé chaque goutte; tant qu'il ne se produit pas une mousse persistante, c'est qu'il reste encore des sels terreux dans la liqueur; aussitôt qu'on reconnaît l'existence de la mousse persistante, l'opération est terminée; on lit alors sur la burette combien de divisions de la dissolution on a employées, et s'il y en a, par exemple, 17, on dit que l'eau marque 17° à l'hydrotimètre considéré. Si partout on emploie le même hydrotimètre, la même dissolution de savon, il est clair que tous les résultats seront comparables, et que l'on aura de la sorte des renseignements précieux sur la crudité relative des eaux employées.

En somme, ce procédé ne donne que des indications approchées; dans des dissolutions qui ne renfermeraient que des sels neutres de chaux, on pourrait de la sorte calculer exactement la proportion de ces sels, mais les sels de magnésie décomposent aussi le savon; de même l'acide carbonique; à ce sujet il faut remarquer que la mousse persistante ne tarde pas elle-même à disparaître parce

que l'acide carbonique de l'air la décompose. Les matières organiques modifient aussi les résultats.

Toutefois, l'hydrotimètre donne des renseignements fort utiles et très-précieux dans la pratique.

Le degré de crudité usité en Angleterre (degré de Hardness), correspond à peu près à 0gr,0142 de carbonate de chaux par litre d'eau; le degré français correspond à 0gr,01 de carbonate par litre; ainsi une eau qui marque 20° à l'hydrotimètre renferme théoriquement 0gr,20 de carbonate de chaux par litre.

Voici quelques nombres donnés par M. l'inspecteur général Belgrand :

Sources du granit du Morvan.	2° à 11°	à l'hydrotimètre.
Sources des sables de la craie inférieure. . . .	7° à 12°	—
Sources des sables de Fontainebleau.	6° à 22°	—
Sources de la craie blanche.	12° à 17°	—
Sources des calcaires de la Beauce.	17° à 25°	—
Sources du niveau d'eau des marnes vertes et des marnes du gypse (plâtre ou sulfate de chaux).	23° à 155°	—

D'après M. Belgrand, les eaux du bassin de la Seine ne sont pas incrustantes, lorsque leur degré hydrotimétrique ne dépasse pas 18°.

Purification des eaux. — Nous avons déjà indiqué la distillation et la marche à suivre pour l'employer.

Pour débarrasser les eaux du sulfate de chaux, il suffit de leur ajouter un peu de carbonate de soude qui précipite la chaux à l'état de carbonate insoluble, ou plus simplement des cendres de bois qui, par leur carbonate de potasse, produisent le même effet.

Le sulfate de chaux se transforme en sulfate alcalin inoffensif.

Les eaux calcaires se purifient, soit par l'ébullition, soit par l'addition d'une certaine quantité de chaux, de façon à ramener le bicarbonate à l'état de carbonate insoluble. On peut encore faire bouillir les eaux avec des sels alcalins ou avec des cendres.

On s'assure de la pureté d'une eau distillée au moyen des réactifs suivants :

1° L'oxalate d'ammoniaque donnera un précipité blanc d'oxalate de chaux s'il reste de la chaux ;

2° L'acide sulfhydrique ou mieux le sulfhydrate d'ammoniaque précipite tous les sels métalliques à l'état de sulfures ;

3° L'azotate de baryte indique la moindre trace d'acide sulfurique ; le sulfate de baryte étant absolument insoluble ;

4° L'azotate d'argent indique la moindre trace d'acide chlorhydrique ou de chlorure ;

5° Le chlorure d'or est décomposé et l'or se précipite en présence des matières organiques ;

6° La teinture alcoolique de bois de campêche, du jaune passe au violet en présence de l'ammoniaque ou du carbonate d'ammoniaque.

Composé hydrogéné de l'azote. Ammoniaque. — L'ammoniaque est un gaz incolore, à saveur très-âcre, à odeur vive et piquante ; il a sur les yeux une influence funeste, et provoque sans cesse les larmes, densité 0,591. L'eau en dissout plus de 1,000 fois son volume, et une éprouvette pleine de gaz ammoniac que l'on plonge dans l'eau est instantanément remplie ; le gaz disparaît, et il se produit un choc violent qui souvent brise l'éprouvette.

L'ammoniaque se liquéfie sous la pression ordinaire à —40°, ou encore dans un

mélange d'acide carbonique solide et d'éther. On prépare le plus souvent cette dissolution au moyen du chlorure d'argent bien sec, sur lequel on fait passer un courant d'ammoniaque ; le chlorure absorbe à la température ordinaire jusqu'à 320 fois son volume de ce gaz et l'abandonne vers 40°. Dans un tube résistant recourbé on place d'un côté le chlorure d'argent saturé d'ammoniaque et chauffé au bain-marie; le gaz distille et vient se condenser dans la seconde branche du tube qu'on refroidit au milieu de la glace.

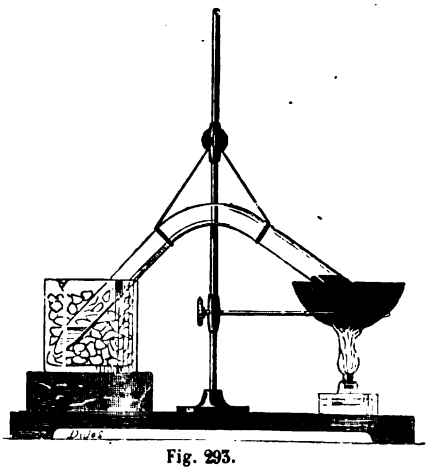


Fig. 293.

L'ammoniaque se décompose au rouge vif, et par l'action continue de l'étincelle électrique, ce qui permet d'avoir sa composition en volume. 1 volume d'ammoniaque est formé de 1 1/2 volume d'hydrogène combiné à 1/2 volume d'azote.

L'ammoniaque n'entretient pas la combustion ; au rouge l'oxygène la décompose en eau et azote ; elle se décompose avec lumière au contact du chlore, et la partie non décomposée s'unit à l'acide chlorhydrique formé, pour donner du chlorhydrate d'ammoniaque ou sel ammoniac :

$$4AzH^3 + 3Cl = 3(AzH^3, ClH) + Az.$$

L'ammoniaque forme avec les oxydes des métaux nobles (or, mercure, argent) des composés mal connus qui détonent avec une grande violence.

Quelques grains d'iode arrosés d'ammoniaque en dissolution et desséchés donnent un produit des plus explosibles, qui est peu connu.

L'ammoniaque en dissolution ou alcali volatil est connue de toute antiquité ; elle est employée à cautériser les plaies et les morsures, à dissiper l'ivresse (dans ce cas, l'ammoniaque arrivant dans l'estomac s'empare de l'acide carbonique produit en grande abondance, pour former du carbonate d'ammoniaque). L'ammoniaque se trouve, soit à l'état isolé, soit à l'état de carbonates dans les résidus de toutes les fermentations et décompositions organiques. On l'a préparée

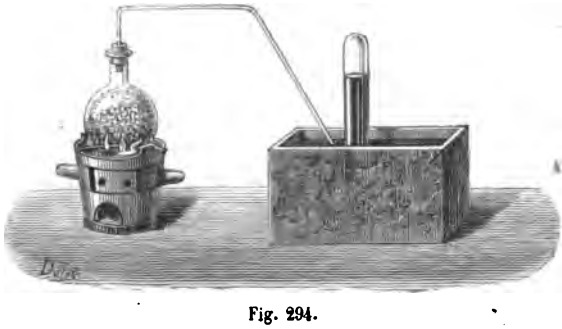


Fig. 294.

dans l'antiquité en l'extrayant de la fiente des chameaux ramassée sur le chemin que prenaient les caravanes en Égypte pour se rendre au temple de Jupiter Ammon ; d'où vient le nom de sel d'Ammon, sel ammoniac.

Préparation. — Pour l'avoir à l'état gazeux, on pile et on pulvérise ensemble parties égales de chlorhydrate d'ammoniaque et de chaux vive; on place le mélange dans un petit ballon que l'on achève de remplir avec de la chaux vive. On chauffe et l'on recueille le gaz sur le mercure. La chaux décompose le sel, il se forme du chlorure de calcium, de l'eau et du gaz ammoniac.

$$AzH^3,HCl + CaO = CaCl + HO + AzH^3$$

L'eau est absorbée par le chlorure de calcium et par la chaux vive.

— La dissolution ammoniacale qui est seule usitée se prépare avec un appareil de Woolf; cette dissolution étant plus légère que l'eau se rend à la partie su-

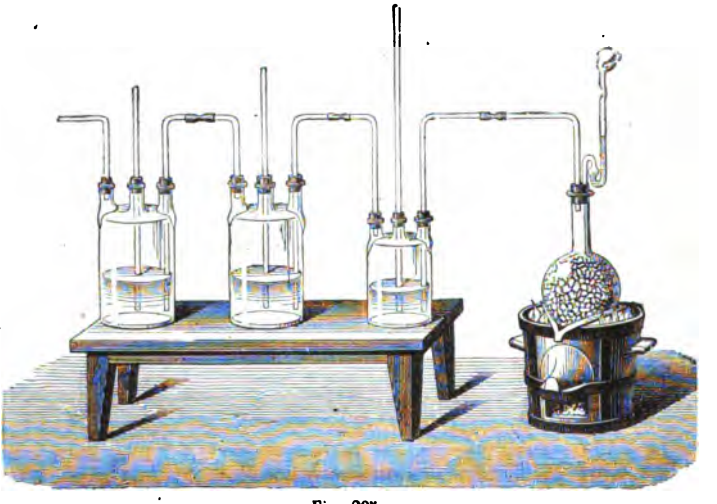


Fig. 295.

périeure des flacons, et il faut avoir soin de faire plonger les tubes qui amènent le gaz jusqu'au fond des flacons.

Dans l'industrie, au lieu de sel ammoniac, on prend les eaux ammoniacales résultant de la purification du gaz d'éclairage préparé par la distillation de la houille.

Sels ammoniacaux. — Avec les hydracides, tels que l'acide chlorhydrique, l'ammoniaque forme des sels de la forme

$$AzH^3,HCl$$

tandis que la potasse et la soude avec les mêmes acides donnent des composés binaires tels que le chlorure de sodium ou sel marin

$$NaO + HCl. = NaCl + HO$$

Cependant le chlorure de sodium NaCl et le chlorhydrate d'ammoniaque présentent des propriétés parallèles et sont deux corps à qui l'on doit donner une composition analogue, c'est ce qui engage à écrire le chlorhydrate d'ammonia-

que (AzH^4) Cl, et à l'appeler chlorure d'ammonium. L'ammonium est, d'après cela, un radical hypothétique jouant le rôle de corps simple.

Si nous prenons les acides oxygénés, ils forment avec l'ammoniaque des sels qui ont toujours une formule, telle que (AzH^3, HO, SO^3) (AzH^3, HO, AzO^5), ils renferment un équivalent d'eau qu'on ne saurait leur enlever sans les décomposer et comme ces sels sont entièrement semblables aux sulfates et azotates alcalins NaO,SO^3 NaO,AzO^5 on arrive, pour identifier les formules, à appeler le sulfate d'ammoniaque sulfate d'oxyde d'ammonium (AzH^4O, SO^3) (AzH^4O, AzO^5).

La théorie de l'ammonium est une hypothèse ingénieuse qui n'est pas pleinement justifiée.

Acide sulfhydrique (HS).— Gaz incolore, dont l'odeur et la saveur sont celles des œufs pourris ; acide faible ; densité 1,19, se liquéfie sous la pression de 18 atmosphères à la température ordinaire. Formé de deux éléments combustibles, il brûle à l'air avec une flamme bleue. Il n'entretient pas la respiration ; bien plus, c'est un poison violent ; une atmosphère qui en renferme $\frac{1}{1500}$ de son volume suffit pour tuer un oiseau, et $\frac{1}{200}$ pour tuer un cheval ; les serpents et animaux à sang froid peuvent vivre au milieu de ce gaz.

Se décompose par la chaleur, et même détone s'il est mêlangé à l'oxygène. A l'air humide, l'acide sulfhydrique se décompose et il se forme un dépôt de soufre $HS + O = HO + S$.

L'eau dissout environ trois fois son volume d'acide sulfhydrique, mais la dissolution s'altère rapidement à l'air en donnant un dépôt de soufre, et il faut la conserver dans un flacon renversé dont le goulot plonge dans le mercure.

En présence de l'humidité, les acides sulfhydrique et sulfureux se décomposent rapidement avec dépôt de soufre

$$2HS + SO^2 = 2HO + 3S$$

L'acide sulfhydrique humide imprégnant un corps poreux peut s'oxyder complétement, le soufre ne se dépose pas, mais se transforme en acide sulfurique.

Le chlore décompose immédiatement l'acide sulfhydrique, il se produit de l'acide chlorhydrique et du soufre.

L'acide sulfhydrique est à l'état naturel dans certaines eaux bien connues, telles que celles de Barèges. Il se dégage en même temps que l'ammoniaque dans les putréfactions de matières animales et végétales ; dans les fosses d'aisances, le sulfhydrate d'ammoniaque produit de fréquents accidents en asphyxiant les vidangeurs ; on peut s'en débarrasser et purifier la fosse avant d'y descendre au moyen d'une dissolution de sulfate de fer que l'on y verse, il se forme du sulfate d'ammoniaque et du sulfure de fer qui se dissolvent, et le gaz dangereux disparaît.

$$FeO,SO^3 + AzH^4S = AzH^4O,SO^3 + FeS$$

Préparation. — 1° Dans un flacon à moitié rempli d'eau on met du sulfure de fer en fragments et on verse peu à peu de l'acide sulfurique par le tube central : il se forme du sulfate de fer et il se dégage de l'acide sulfhydrique qu'on recueille sur l'eau :

$$FeS + SO^3,HO = FeO,SO^3 + HS$$

2° Pour obtenir l'acide sulfhydrique, on chauffe dans un ballon un mélange

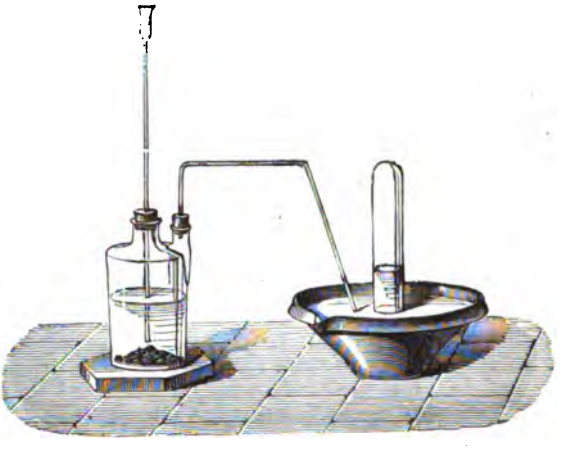


Fig. 296.

de sulfure d'antimoine pulvérisé et d'acide chlorhydrique ; un flacon laveur contenant de l'eau absorbe l'acide chlorhydrique entraîné.

$$Sb^2S^3 + 3HCl = 3HS + Sb^2Cl^3$$

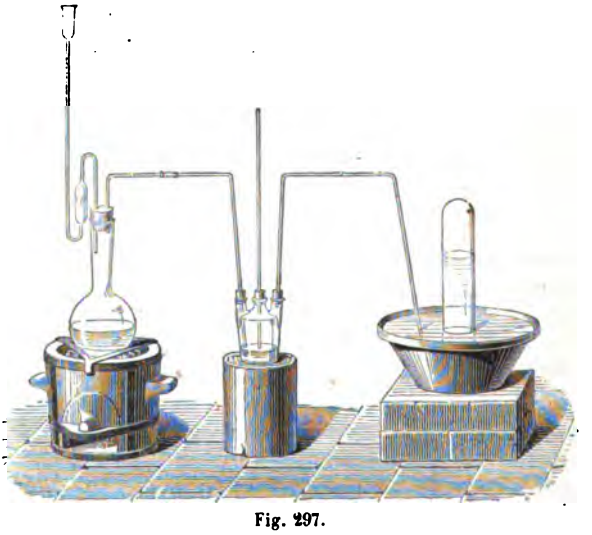


Fig. 297.

Acide chlorhydrique (HCl). — Autant les composés oxygénés du chlore sont faciles à détruire, autant l'unique composé hydrogéné est stable. C'est un acide énergique. Gaz incolore, piquant et suffocant ; n'entretient pas la combustion ; densité 1,25 ; très-soluble dans l'eau, il répand au contact de l'air d'épaisses fumées, parce qu'il absorbe la vapeur d'eau de l'air et forme un composé qui se précipite en brouillard.

Nous avons vu qu'à la lumière solaire, le chlore et l'hydrogène se combinaient

avec violence à volumes égaux; à l'ombre, la combinaison se fait aussi sûrement mais lentement, et l'on constate que 1 vol. d'hydrogène + 1 vol. chlore = 2 volumes acide chlorhydrique. A la température ordinaire, l'eau dissout 500 fois son volume de gaz chlorhydrique : présentez sur la cuve à eau une éprouvette pleine de ce gaz, l'eau s'y précipite avec violence et souvent le choc brise l'éprouvette. La glace fond rapidement dans le gaz chlorhydrique.

On connaît trois hydrates définis d'acide chlorhydrique :

$$HCl+6HO \quad HCl+12HO \quad HCl+16HO$$

Avec les oxydes métalliques MO, l'acide chlorhydrique forme un chlorure et de l'eau

$$MO+HCl=MCl+HO-$$

Le signe caractéristique de la présence de l'acide chlorhydrique ou d'un chlo-

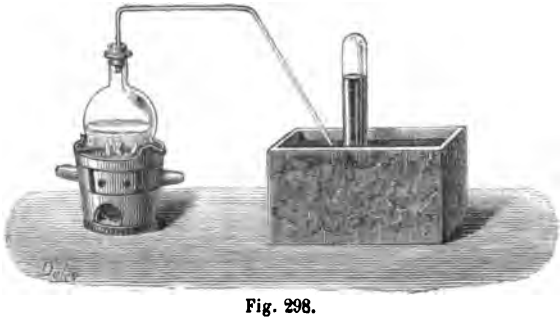


Fig. 298.

rure soluble est de donner dans les sels d'argent un précipité blanc, semblable

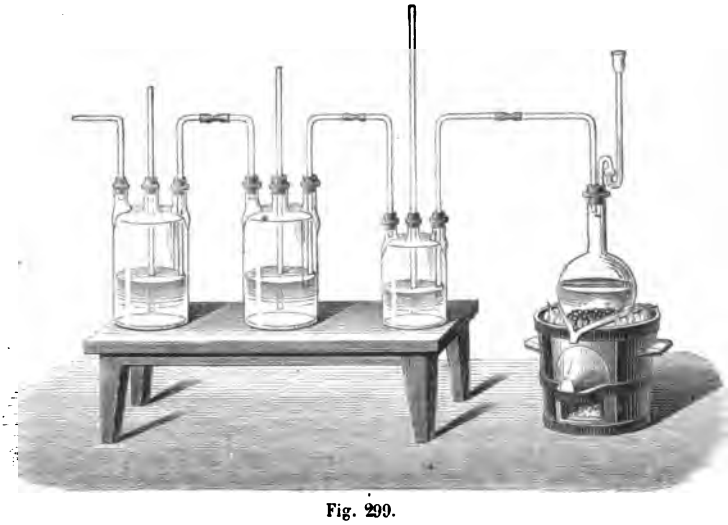


Fig. 299.

à du lait caillé, qui noircit à l'air, absolument insoluble dans l'eau pure et l'acide azotique, mais soluble dans l'ammoniaque.

Préparation. — Chauffer dans un ballon du sel marin ou chlorure de sodium avec l'acide sulfurique concentré, il se forme du sulfate de soude et de l'acide chlorhydrique qu'on recueille à l'état gazeux sur la cuve à mercure.

$$NaCl + SO^3,HO = NaO,SO^3 + HCl$$

La dissolution se prépare avec un appareil de Woolf: le premier flacon est un flacon laveur chargé d'acide chlorhydrique du commerce et destiné à arrêter les vapeurs d'acide sulfurique.

La préparation industrielle se fait avec des cornues en fonte et des bonbonnes en grès.

Eau régale. — L'or et le platine ne sont attaqués ni par l'acide azotique, ni par l'acide chlorhydrique séparés. Mais un mélange de ces deux acides attaque ces métaux qui se transforment en chlorures. En examinant ce qui se passe, on voit que dans le mélange il se produit du chlore et des vapeurs vitreuses.

$$AzO^5 + ClH = AzO^4 + Cl + HO.$$

Le chlore à l'état naissant a une action efficace.

Carbures d'hydrogène. — Le nombre des carbures d'hydrogène est très-considérable, et la chimie organique nous en offre à chaque instant ; les huiles de térébenthine, de naphte et plusieurs huiles et essences sont des carbures.

Nous ne parlerons que des deux carbures les plus simples et les plus stables : l'hydrogène protocarboné ou gaz des marais et l'hydrogène bicarboné ou gaz oléfiant.

Hydrogène protocarboné ($C^2\,H^4$). — C'est un gaz incolore, complétement insoluble dans l'eau, densité 0,559. Il brûle avec une flamme pâle à l'approche d'un corps en ignition et détone violemment lorsqu'il est mélangé à l'oxygène ou à l'air et qu'on l'enflamme. Il est sans odeur, sans saveur, neutre aux réactifs colorés tels que la teinture de tournesol.

Avec le chlore, il détone violemment, si l'on expose le mélange à la lumière solaire, avec formation d'acide chlorhydrique ; à l'ombre le chlore s'empare successivement des diverses molécules d'hydrogène, et donne les composés

$$C^2H^3Cl, C^2H^2Cl^2,\ C^2HCl^3.C^2Cl^4.$$

A une température très-élevée, l'hydrogène protocarboné est réduit en ses deux éléments.

Lorsque avec un bâton on agite la vase des marais, il s'en dégage des bulles gazeuses qu'on peut recueillir dans un flacon plein d'eau, au moyen d'un entonnoir. Ce gaz est un mélange d'hydrogène protocarboné, d'oxygène, d'acide carbonique et d'azote ; on enlève l'oxygène en agitant avec une dissolution d'acide pyrogallique, on enlève l'acide carbonique par la potasse ; l'azote reste mélangé au gaz des marais.

Fig. 300.

On peut le préparer dans les laboratoires en décomposant l'acide acétique, soit sur de la mousse de platine portée au rouge, soit en le faisant bouillir avec les alcalis. On chauffe, dans un ballon un mélange intime d'acétate de soude et de chaux sodée (chaux calcinée avec de la

soude caustique, il se forme du carbonate de soude et de l'hydrogène protocarboné :

$$NaO,C^4H^3O^5+NaO,HO=2(NaO,CO^2)+C^2H^4.$$

Il est certains endroits en Italie, en Sicile, en Crimée, à Java, autour de la mer Caspienne, où il existe des dégagements continuels de gaz hydrogène protocarboné. Ce sont comme des volcans gazeux dont on se sert pour cuire la chaux et les briques.

Le sel gemme en renferme quelquefois.

Il se produit spontanément dans les mines de houille, s'accumule à la partie supérieure des galeries, les remplit, et s'il rencontre une lumière détone avec violence. Telle est l'explication du feu grisou qui a causé la mort de tant d'ouvriers.

C'est à Davy que revient l'honneur d'avoir trouvé un remède à ce fléau terrible.

Lorsqu'on abaisse une toile métallique à mailles serrées sur la flamme d'une lampe ou d'une bougie, on écrase cette flamme ; le courant gazeux traverse la toile, mais la flamme est interceptée, la toile métallique absorbe trop de chaleur pour que les gaz puissent s'enflammer. En abaissant suffisamment la toile on peut éteindre la flamme. D'après cela, si l'on a une lampe entourée d'une toile métallique et qu'on la plonge au milieu d'un mélange détonant comme le grisou, la détonation se fera à l'intérieur de l'espace fermé par la toile, la lampe s'éteindra, mais la chaleur sera arrêtée par la toile et le gaz extérieur ne sera pas enflammé. L'ouvrier subira qu'un inconvénient, celui d'être plongé dans l'obscurité.

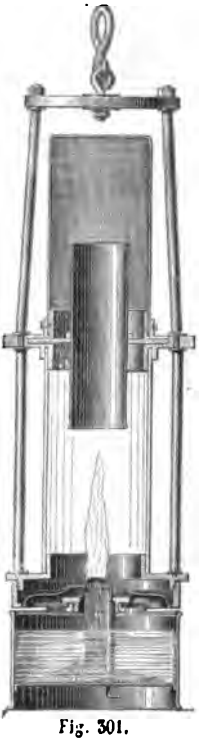


Fig. 301.

La toile métallique avait le désavantage d'intercepter une grosse partie de la lumière, et les ouvriers déchiraient souvent l'enveloppe pour être moins gênés dans leur travail. La lampe de Davy a été perfectionnée, et la figure ci-jointe représente celle de M. Combes, inspecteur général des mines. La flamme de la lampe à huile est entourée d'un cylindre de verre dans lequel pénètre un tube formant la cheminée d'appel, et à la partie supérieure est un cylindre de toile métallique fermé par en haut.

Malgré toutes les précautions prises, le nombre des accidents par le grisou est encore considérable, et il est nécessaire de combiner l'emploi de la lampe de Davy avec une ventilation énergique.

Hydrogène bicarboné (C^4H^4). — C'est un gaz incolore, insipide, à odeur empyreumatique, densité 0,985. Décomposable par la chaleur et l'électricité, on le liquéfie dans un bain d'acide carbonique et d'éther sous une pression de plusieurs atmosphères.

Il brûle à l'air avec une flamme blanche très-éclairante parce qu'elle est très-riche en carbone, sans cependant en renfermer trop, comme les résines et les huiles à flammes fumeuses. Mélangé à l'oxygène, il détone violemment à l'approche d'un corps en ignition.

Le chlore forme avec l'hydrogène bicarboné un mélange qui brûle quand on

l'enflamme et donne de l'acide chlorhydrique et du charbon en poussière très-fine. A la lumière diffuse, si l'on abandonne le mélange à lui-même, les gaz disparaissent, et il se forme une huile qu'on appelle liqueur des Hollandais et qui a fait donner au bicarbure d'hydrogène le nom de gaz oléfiant. A volumes égaux les deux gaz disparaissent complétement et l'on a le corps $C^4 H^4 Cl^2$.

Préparation. — Il se produit toujours dans la calcination des substances organiques riches en carbone (résines, graisses, huile, houille); il forme la plus grande partie du volume du gaz d'éclairage, auquel il donne son éclat.

L'alcool $C^4 H^6 O^2$ peut se considérer comme un hydrate de bicarbure d'hydrogène ($C^4 H^4 + 2 HO$; chauffé avec l'acide sulfurique concentré, il abandonne son eau et le gaz $C^4 H^4$ se dégage à l'état de grande pureté. Dans le ballon on verse

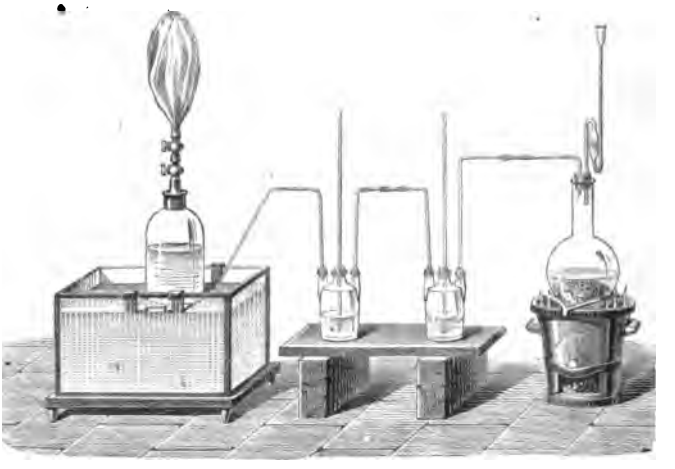


Fig. 502.

de l'alcool concentré, puis de l'acide sulfurique peu à peu de façon à éviter un échauffement brusque. Un premier flacon laveur à la potasse arrête les portions d'acide carbonique et d'acide sulfureux qui se forment : un second rempli d'acide sulfurique concentré arrête les vapeurs d'éther ($C^4 H^5 O$). Il faut chauffer à 180° ; car à 160°, on n'enlèverait qu'un équivalent d'eau à l'alcool et l'on n'obtiendrait que de l'éther $C^4 H^5 O$. Il faut avoir soin de mettre du sable dans le ballon, il régularise le dégagement gazeux, et, sans lui, il se produit un boursouflement considérable.

Gaz d'éclairage. — Inventé par un ingénieur français, Lebon, le gaz d'éclairage ne fut employé qu'en 1820. On sait combien l'usage en est aujourd'hui développé.

On le produit par la calcination en vase clos des houilles à longue flamme: on introduit la houille dans des cornues de terre ou de fonte, fermées avec un couvercle à vis, et que l'on porte au rouge cerise (il ne faut pas chauffer à blanc pour ne pas décomposer les carbures). Voir la planche II. De la cornue sort un tube deux fois recourbé à angle droit et qui débouche dans le barillet B. Le barillet est un cylindre horizontal à moitié rempli d'eau, dans laquelle plonge le tube qui amène le gaz de la cornue. De la sorte le gaz fabriqué ne communique pas avec la cornue, et il n'y a pas d'explosion à craindre.

Le gaz qui se dégage contient beaucoup d'hydrogène et de carbures d'hydro-

gène, mais aussi on y trouve de l'azote, de l'oxyde de carbone, avec de la vapeur d'eau, du sulfhydrate d'ammoniaque, du sulfure de carbone, de l'acide sulfhydrique, dont il faut débarrasser le gaz, sans quoi il répandrait une odeur infecte et serait moins éclairant.

Une grande partie du goudron reste dans l'eau du barillet et s'échappe peu à peu par un trop-plein. Du barillet B, le gaz passe dans le réfrigérant C, formé d'une série de tubes en U renversés et appliqués sur une bâche en fonte remplie d'eau et séparée par des cloisons, sur lesquelles les tubes sont à cheval. Il faut donc que le gaz traverse toutes les caisses et tous les tubes. Le gaz se refroidit et se débarrasse de son goudron, de sa vapeur d'eau et de son ammoniaque.

Vient ensuite un cylindre de fonte F divisé par une cloison en deux parties et rempli de coke ; le gaz traverse ce coke, et par ce filtrage abandonne le reste du goudron et de la vapeur d'eau.

De là il passe dans les caisses H où il rencontre des claies chargées d'un mélange de plâtre, de sesquioxyde de fer et de sciure de bois. Le plâtre absorbe l'ammoniaque, en donnant du sulfate d'ammoniaque qu'on extraira par un lavage ; l'acide sulfhydrique est décomposé par le sesquioxyde de fer, il se forme du sulfure de fer et un dépôt de soufre.

De là le gaz passe dans le gazomètre.

Tous les résidus du gaz ont une grande valeur, et à toute usine à gaz importante il faut annexer une fabrique de produits chimiques.

Sulfure de carbone (CS^2). — C'est un liquide incolore, très-mobile, doué d'une odeur fort désagréable rappelant celle des choux pourris. Très-volatil, il bout à 46°. Sa densité à 15° est 1,27 et sa densité de vapeur 2,67.

Il brûle avec flamme bleue en donnant des acides sulfureux et carbonique. Sa vapeur mêlée à l'air détone violemment à l'approche d'une lumière. Insoluble dans l'eau, soluble dans l'alcool, l'éther, c'est le dissolvant par excellence du soufre et du phosphore.

Le sulfure de carbone s'unit aux sulfures métalliques MS, en donnant des sels MS, CS^2, analogues aux sels oxygénés MO CO^2 ; aussi lui donne-t-on le nom d'acide sulfocarbonique.

Préparation. — On place un tube de porcelaine dans un four à réverbère in-

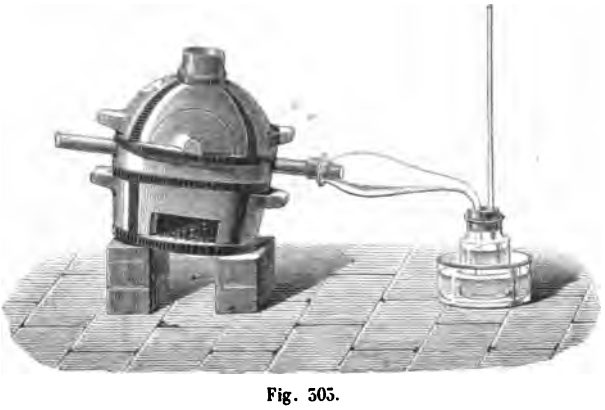


Fig. 305.

cliné, et d'un bout on le ferme par un bouchon, de l'autre, on lui adapte une allonge en verre qui communique avec un flacon refroidi dans l'eau.

Dans le tube de porcelaine est de la braise de boulanger que l'on porte au rouge, on enlève le bouchon de temps en temps pour introduire des fragments de soufre qui se vaporisent; la vapeur se combine au charbon et le sulfure de carbone se condense dans l'allonge et dans le flacon.

Le caoutchouc est une substance élastique que chacun connaît; c'est une gomme exsudée par certains végétaux. Le caoutchouc pur se durcit par le froid et devient cassant; il se ramollit par la chaleur et devient adhérent; au contraire, le caoutchouc vulcanisé, c'est-à-dire imprégné d'un peu de soufre, prend une élasticité permanente que rien n'altère. Pour vulcaniser le caoutchouc on le plonge dans un bain de sulfure de carbone renfermant deux et demi pour cent de soufre en dissolution, puis on l'expose dans un courant d'air où le sulfure de carbone s'évapore, laissant le soufre.

Cyanogène (C^2Az ou Cy).— Le cyanogène est un carbure d'azote, c'est un gaz incolore, qui a l'odeur forte d'amandes amères, brûle avec une flamme bleu-pourpre. Il est très-instable et tend à se combiner avec les corps en présence.

Il offre ce spectacle singulier de se conduire comme un véritable corps simple, analogue au chlore; il donne avec l'hydrogène un acide énergique, analogue à l'acide chlorhydrique, l'acide cyanhydrique C^2AzH ou CyH, qui est un poison

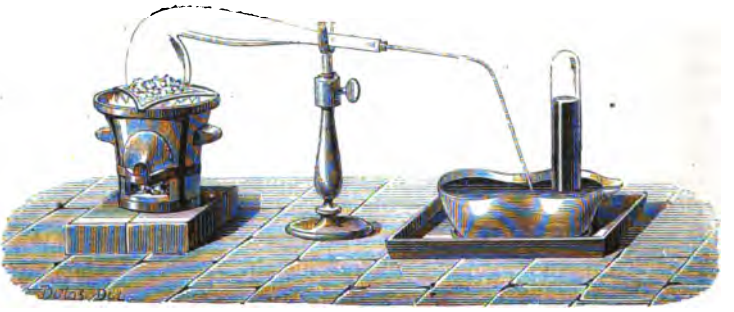


Fig. 304.

d'une violence inouïe, plus connu sous le nom d'acide prussique. Avec l'oxygène, le cyanogène donne un acide cyanique. Avec les métaux, il forme des cyanures qui ont toutes les propriétés des chlorures.

Le cyanogène se prépare en distillant dans une petite cornue de verre le cyanure de mercure et recueillant le gaz sur le mercure.

Le cyanogène entre avec le fer dans la constitution du bleu de Prusse, c'est de là que vient son nom (*cyanos*, bleu).

Le cyanogène se produit quand le charbon et l'azote se rencontrent à l'état naissant, surtout en présence d'un alcali ou d'un carbonate alcalin. La calcination des matières animales azotées, telles que les débris des abattoirs, avec le carbonate de potasse donne un cyanure de potassium.

L'ammoniaque, passant sur du charbon au rouge, est en partie décomposée et il se forme du cyanhydrate d'ammoniaque.

$$2AzH^3 + 2C = C^2AzH, AzH^3 + 2H.$$

CHAPITRE III

MÉTAUX

Leur classification. — Métaux alcalins et terreux; métaux usuels; aluminium, manganèse, fer, chrome, zinc, étain, plomb, cuivre, mercure, argent, or, platine. — État naturel; caractères distinctifs. — Usages industriels. — Notions sur la fabrication des fers fontes et aciers. — Combinaisons des métaux et alliages entre eux et alliages utiles à l'industrie. — Action de l'oxygène sur les métaux. — Sels neutres, acides, basiques. — Cristallisation, fusion solubilité des sels. — Caractères distinctifs des sels, d'après leurs acides et d'après leurs bases.

Classification des métaux. — La classification artificielle des métaux, donnée par Thenard et perfectionnée par M. Regnault, a pour point de départ l'affinité plus ou moins énergique des métaux pour l'oxygène.

On a pris, pour mesurer cette affinité, trois termes de comparaison :

1° La facilité plus ou moins grande avec laquelle les métaux décomposent un composé oxygéné stable, tel que l'eau.

2° La difficulté qu'on éprouve à réduire les oxydes métalliques sous l'influence de la chaleur;

3° La manière dont ils se comportent en présence de l'oxygène.

1re classe.	Potassium. . . Sodium. . . . Lithium. . . . Baryum. . . . Strontium. . . Calcium. . . .		Décomposent l'eau à froid. — Oxydes irréductibles par la chaleur seule. — Absorbent l'oxygène à toute température.
2e classe.	Magnésium. . Cérium. . . . Glucinium. . . Yttrium. . . . Zirconium. . . Aluminium. .	Lanthane. . . Didymium. . . Erbium. . . . Terbium. . . — —	Décomposent l'eau à 100°. — Oxydes irréductibles par la chaleur seule. — Absorbent l'oxygène par la chaleur.
3e classe.	Manganèse. . . Fer. . . . . . Zinc. . . . . Nickel. . . . Cobalt.	Vanadium . . Cadmium. . . Chrome. . . . — —	Décomposent l'eau au rouge ou à froid sous l'influence de l'acide sulfurique étendu. — Oxydes irréductibles par la chaleur seule.— Absorbent l'oxygène au rouge.
4e classe.	Étain. . . . . Antimoine. . Uranium. . . Titane . . . Molybdène. .	Tungstène. . . Colombium. . Pélopium. . . Niobium. . . Osmium. . . .	Décomposent l'eau au rouge, mais ne la décomposent pas à froid en présence de l'acide sulfurique étendu. — Oxydes irréductibles par la chaleur seule. — Absorbent l'oxygène au rouge.
5e classe.	Cuivre. . . . Plomb. . . . Bismuth. . .		Décomposent l'eau au rouge blanc, mais ne la décomposent pas en présence des acides. — Oxydes partiellement réductibles par la chaleur. — Absorbent l'oxygène au rouge.

6e classe..	Mercure.. . .	Ne décomposent l'eau à aucune température. — Absorbent l'oxygène à une certaine température, et l'abandonnent à une température plus élevée.
	Rhodium. . .	
7e classe..	Argent... . .	Ne décomposent l'eau à aucune température. — N'absorbent l'oxygène à aucune température. — Oxydes très-facilement réductibles.
	Or.	
	Platine. . . .	
	Palladium. . .	
	Ruthénium. .	
	Iridium.. . .	

Parmi tous ces métaux, ceux des deux premières classes n'ont pas d'emploi pratique ; on ne saurait les conserver à l'air, et on ne s'en sert que comme agents réducteurs très-énergiques. C'est ainsi que le sodium sert à préparer le bore, le silicium et l'aluminium dont il réduit les oxydes. Les métaux de la première classe ont pour oxydes des alcalis, ce sont les métaux alcalins ; les métaux de la deuxième classe ont pour oxydes ce qu'on appelait autrefois des terres, et ce sont les métaux terreux. Les autres ont vraiment les propriétés métalliques usuelles ; l'éclat, la malléabilité, la ténacité, la conductibilité ; ce sont ceux qui nous occuperont le plus.

Potassium et sodium. — Le potassium est un corps solide ; récemment préparé, il possède l'éclat métallique, mais le perd rapidement à l'air, densité à 15° 0,865, fond à 58°, et bout au rouge sombre en dégageant une belle vapeur verte.

En 1807, Davy tira le potassium de la potasse en décomposant celle-ci par la pile. Plus tard, Gay-Lussac le prépara en décomposant l'hydrate de potasse par le fer à une haute température. Aujourd'hui, on le prépare en décomposant le carbonate de potasse par le charbon à une haute température.

La propriété caractéristique du potassium et du sodium est de décomposer l'eau avec énergie. Un globule de ces métaux projeté dans l'eau, se promène à la surface en produisant le bruit du fer rouge que l'on trempe, et le bruit est accompagné d'une flamme verdâtre.

Le sodium a les mêmes propriétés et le même aspect que le potassium ; il est seulement un peu plus stable, densité 0,97. On s'en sert beaucoup aujourd'hui pour préparer l'aluminium, et voici comment on opère : dans un four que l'on peut chauffer à de très-hautes températures, on place une bouteille en fer, renfermant un mélange de carbonate de soude bien sec, de houille et de craie. Au tube de la cornue s'adapte une boîte plate en tôle où le sodium se liquéfie ; les gaz s'échappent à la partie supérieure de cette boîte, ces gaz consistent surtout en oxyde de carbone. Le filet de sodium liquide tombe dans une petite marmite, remplie d'huile de naphte et le métal se solidifie. On le purifie en le faisant fondre dans l'huile de schiste qui est moins volatile que l'huile de naphte.

Potasse et soude. — On connaît la potasse et la soude anhydre Ko, NaO, et même des trioxydes Ko^3, NaO^3, mais tout cela est sans usage et l'on n'emploie que la potasse et la soude caustiques Ko,Ho et NaO, Ho.

La potasse caustique est un corps solide blanc, bien connu sous le nom de pierre à cautère parce qu'elle sert à ronger, à brûler, à cautériser les chairs ; elle fond à 400° et se volatilise au rouge blanc. Elle est très-avide d'eau ; aussi à l'air est-elle déliquescente, c'est-à-dire qu'elle absorbe l'humidité atmosphérique et s'affaisse (elle tombe en déliquium) ; elle forme avec l'eau un nouvel hydrate Ko, 5Ho.

Elle se prépare en dissolvant dans une chaudière en fonte du carbonate de po-

tasse que l'on décompose en le faisant bouillir avec de la chaux éteinte; il faut un excès d'eau, sans quoi la potasse concentrée décomposerait le carbonate de chaux qui se forme. On laisse reposer le liquide, pour que le précipité de calcaire se dépose au fond, puis on le décante et on le concentre dans une bassine de cuivre ou mieux d'argent. Lorsque le liquide est à l'état de sirop, on le coule sur une ta-

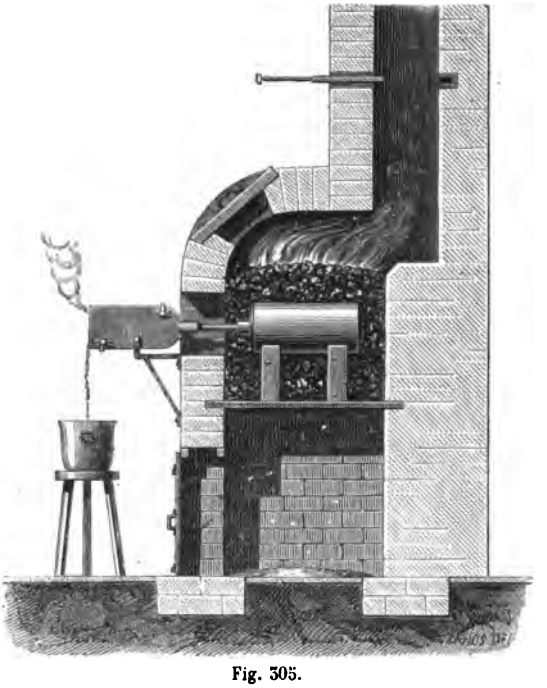


Fig. 305.

ble de marbre, où la potasse se solidifie; on la coupe en morceaux, et on la renferme dans des flacons à l'abri de l'humidité; c'est la potasse à la chaux.

Le carbonate de chaux employé n'est pas pur et renferme des sels étrangers qui ne disparaissent point et se retrouvent dans la potasse à la chaux. Or ces sels ne sont généralement pas solubles dans l'alcool; la potasse, au contraire, s'y dissout. On agite donc la potasse à la chaux avec de l'alcool, on laisse reposer et la partie supérieure du liquide contient la potasse; on décante, et on concentre dans une bassine d'argent, on obtient ainsi la potasse à l'alcool, qui n'est pas non plus complétement pure et renferme un peu de carbonate, par suite de la décomposition de l'alcool.

Les propriétés et la préparation de la soude sont les mêmes que celles de la potasse; toutefois, elle est déliquescente à l'air, mais ne tarde pas à se transformer en poussière, parce que le carbonate de soude formé avec l'acide carbonique de l'air, n'est pas déliquescent comme le carbonate de potasse.

Carbonates de potasse et de soude. — Les carbonates de potasse et de soude sont, ce qu'on appelle les potasses et soudes du commerce.

Le carbonate de potasse s'extrait de la cendre des végétaux, qui croissent à l'intérieur des terres. On traite ces cendres par l'eau, qui ne dissout ni les terres ni les oxydes de fer et de manganèse, mais qui retient les carbonate, phosphate et

sulfate de potasse, les chlorures alcalins et un peu de carbonate de soude. Les carbonates proviennent de la décomposition par la chaleur de tous les sels organiques. On lessive donc les cendres, et on concentre la lessive pour obtenir le salin. On chauffe le salin au rouge afin de brûler les matières organiques, qu'il renferme encore et l'on obtient la potasse brute. On dissout la potasse brute dans l'eau, puis on concentre; les sels étrangers moins solubles se déposent; on décante et on évapore pour obtenir la potasse raffinée.

La valeur de la potasse et de la soude du commerce est très-variable, et dépend de la quantité de carbonate pur qu'elle contient. On constate cette proportion par les essais alcalimétriques. On appelle titre pondéral d'une potasse la proportion pour cent d'alcali pur qu'elle renferme au quintal.

Les équivalents montrent qu'il faut 50 grammes d'acide sulfurique monohydraté pour saturer 48gr,16 de potasse anhydre, et faire le sel Ko,So^3. Dissolvons d'une part 50 grammes d'acide sulfurique dans un demi-litre d'eau, et d'autre part 48gr,16 de potasse pure dans un demi-litre d'eau, il faudra verser tout l'acide dans la potasse pour neutraliser celle-ci ; mais si l'alcali n'est pas pur, il faudra, par exemple, seulement la moitié ou le tiers de l'acide pour neutraliser la potasse, donc cette potasse du commerce ne renferme que la moitié ou le tiers de son poids d'alcali pur, et il faut en évaluer le prix en conséquence. Avant de verser l'acide sulfurique dans la potasse, on ajoute à celle-ci quelques gouttes de teinture bleue de tournesol, puis on verse l'acide goutte à goutte; le carbonate de potasse est décomposé, l'acide carbonique se dégage et colore en rouge vineux la teinture de tournesol et, par suite, toute la masse liquide. Aussitôt que la décomposition est terminée, il y a une goutte d'acide sulfurique non neutralisée et qui donne à la teinture une couleur rouge pelure d'oignon, très-facile à distinguer de la teinte vineuse. A ce moment, l'opération est terminée et il suffit de lire sur la burette graduée combien on a versé de centièmes d'acide sulfurique; la potasse essayée renferme autant de centièmes d'alcali pur.

La soude du commerce ou carbonate de soude s'extrait de la cendre des végétaux qui croissent au bord de la mer, et qui sont très-riches en oxalate que la chaleur décompose. Les soudes ainsi préparées renferment beaucoup de sels étrangers et à peine 1/7 de leur poids de soude; elles viennent surtout d'Espagne.

Pendant la Révolution, la France ne trouvait plus de soude et le médecin Leblanc arriva à en préparer par le procédé artificiel suivant :

On transforme le sel marin ou chlorure de sodium en sulfate de soude au moyen de l'acide sulfurique,

$$NaCl = So^3,HO = NaO,So^3 + HCl$$

puis on décompose, à une température élevée le sulfate de soude par la craie ou carbonate de chaux et le charbon ; il se forme de l'oxyde de carbone, un oxysulfure de calcium insoluble dans l'eau, et du carbonate de soude que l'eau dissout.

$$2(NaO,So^3) + 3(CaO,Co^2) + 9C = 2(NaO,Co^2) + 2(CaS,CaO) + 9CO.$$

Le mélange est poussé dans un four par deux trous verticaux que l'on ferme ensuite. On brasse continuellement la masse par des carneaux latéraux au moyen de longues tiges en fer ou ringards. On retire ensuite la matière, en la faisant tember dans des caisses en tôle où elle se refroidit.

Les carbonates alcalins servent dans le blanchissage du linge, dans la fabrication des savons, dans la fabrication du cristal et du verre.

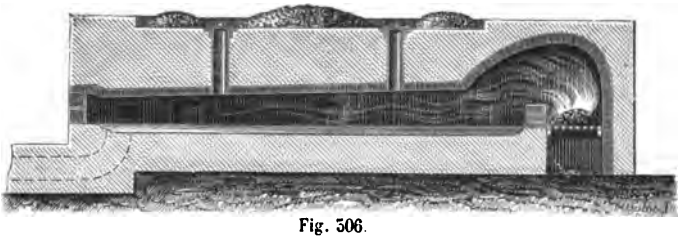


Fig. 506.

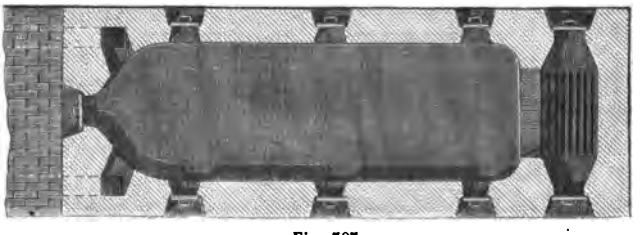


Fig. 507.

Azotate de potasse, nitre ou salpêtre. — Ce sel cristallise en longs prismes à six pans, à saveur fraîche et piquante ; il abandonne assez facilement son oxygène, et se change d'abord en azotite puis en oxyde de potassium ; c'es donc un oxydant énergique; il fuse sur les charbons ardents, c'est-à-dire qu'il fond en produisant une flamme due à la combustion énergique du charbon par l'oxygène dégagé. — Le salpêtre est très-soluble à chaud.

Le salpêtre se trouve à la surface du sol, où il vient effleurir, en Espagne, dans l'Inde, en Égypte, on le retrouve dans les caves, les écuries et tous les lieux humides en général où l'on place des matières organiques azotées en décomposition.

L'acide azotique se produit directement dans l'air par l'électricité ; l'ammoniaque, dégagée dans les putréfactions, se décompose en présence des corps poreux pour donner de l'acide azotique et de l'eau ; l'azote et l'oxygène eux-mêmes peuvent se combiner en présence d'un corps poreux et d'une base. Toutes ces causes peuvent expliquer la génération naturelle du salpêtre : pour qu'elle se produise, il faut la présence d'un calcaire et de matières organiques humides en décomposition ; une température de 20° à 25° est nécessaire aussi.

On prépare artificiellement le salpêtre en mélangeant des terres calcaires avec du fumier, avec des cendres ; on arrose les tas avec des urines, et on dirige sur ces tas une ventilation énergique. Ce sont là des sortes de murailles à la surface desquelles se forment des efflorescences de salpêtre, que l'on racle, et desquelles on tire le nitre par des lessivages.

L'eau qui a servi à une première lessive est employée aux lessives suivantes, et par une série de lavages méthodiques on arrive à concentrer convenablement la dissolution.

On raffine ensuite le salpêtre pour le débarrasser de tous les sels étrangers qu'il renferme, et surtout des chlorures qui, en absorbant l'humidité, ne permettraient pas d'employer le salpêtre à la fabrication de la poudre. On déplace

les chlorures en lavant le salpêtre impur avec une dissolution concentrée à froid d'azotate de potasse pur ; le chlorure est entraîné.

Poudre à canon. — C'est un mélange de salpêtre, de soufre et de charbon. Il faut avoir du salpêtre bien pur et bien débarrassé de chlorures ; on se sert de soufre distillé en masse, et non de fleur de soufre qui renferme toujours des acides sulfureux et sulfurique.

Pour la poudre de chasse, on se sert de charbon obtenu avec du bois de bourdaine torréfié dans des cylindres en tôle ; c'est une espèce de charbon roux ; pour les poudres grossières, on se sert de charbons faits avec des bois légers d'aulne et de peuplier. Il faut rejeter avec soin tous les fumerons.

« La meilleure poudre, pour une arme donnée, est celle qui brûle d'une manière complète dans le temps que le projectile met à parcourir l'âme de la pièce, de manière à lui imprimer, non instantanément, mais successivement toute la force de projection dont elle est susceptible. »

Une poudre, donnant un effet instantané, briserait l'arme, et c'est même ce qui s'oppose à l'emploi du coton-poudre et de la nitro-glycérine.

La poudre se fabrique au moyen de mélanges et de triturations successives des trois matières constitutives, et l'on se sert pour cela soit de pilons mus par un arbre à cames, soit de barils animés d'un vif mouvement de rotation et renfermant des balles de plomb, soit de meules analogues à celles des pressoirs.

Pour que la poudre s'enflamme, il faut que l'on porte au rouge un point de sa masse et l'on a recours pour cela soit à l'étincelle du silex, soit à une mèche, soit à l'explosion par percussion du fulminate de mercure.

Les produits de la combustion de la poudre sont très-nombreux ; il y a des gaz qui sont l'acide carbonique, l'oxyde de carbone, l'azote, la vapeur d'eau, l'acide sulfhydrique ; mais il y a aussi des corps solides, surtout du sulfure de potassium ; c'est là ce qui encrasse les armes, et une bonne poudre doit laisser peu de résidu solide.

Gay-Lussac a montré que la poudre donnait 450 fois son volume de gaz mesuré à 0° et sous la pression 0,76. — Si l'on songe à la haute température produite, on voit que ce volume est considérablement augmenté ; ce gaz tend à déplacer la charge mobile et lui imprime une grande vitesse.

L'équation suivante est une image des réactions qui se passent dans l'explosion de la poudre :

$$KO,AzO^5 + S + 3C = KS + 3Co^2 + Az.$$

La composition de la poudre employée dans les armes ordinaires est à peu près :

74.8 de nitre. .	ou en nombre rond,	75 de nitre.
13,3 de carbone.		13 de charbon.
11,9 de soufre. .		12 de soufre.
100,0		100

Chlorure de sodium ou sel marin (NaCl). — Il cristallise en cubes comme le chlorure de potassium. Chauffé, il décrépite parce qu'il renferme de l'eau interposée entre ses lamelles, puis il fond sans se décomposer. Sa solubilité dans l'eau est à peu près constante ; 100 parties d'eau dissolvent de 35 à 40 parties de sel.

Le sel du commerce est quelquefois déliquescent à l'air humide, parce qu'il renferme des chlorures de magnésium et de calcium, très-avides d'eau.

Il existe des mines de sel gemme que l'on exploite comme des mines de houille; les plus remarquables sont celles de Cardona, en Espagne, et de Wieliczka, en Pologne. Lorsque le sel gemme est impur, on le dissout à l'intérieur de la mine, et on enlève avec des pompes le liquide concentré.

Dans d'autres contrées, il existe des sources d'eau salée ; on les fait arriver au moyen de rigoles au-dessus de grands murs dont la carcasse est en charpente et l'intérieur en fascinages ; l'eau tombe en gouttelettes à travers tous les branchages, et comme la face de ces murailles regarde les vents régnants de la contrée, il se produit une évaporation considérable, et on recueille une eau suffisamment concentrée pour qu'on puisse l'évaporer sur le feu.

La plus grande masse de sel est tirée de la mer :

Dans les pays du Nord, on prend l'eau de mer dans un vase, et on l'expose à la gelée ; on enlève la glace à plusieurs reprises ; or la glace est formée d'eau pure, et il reste un liquide concentré renfermant beaucoup de sel.

En France, sur les côtes de l'Océan et de la Méditerranée, on opère par évaporation de l'eau de mer à l'air libre. L'eau de mer arrive par une pente convenable dans des terrains dont le niveau est inférieur à celui de la marée haute ; on la dirige et on la fait circuler avec une masse de détours dans une série de bassins contigus peu profonds, où l'eau se concentre et dépose beaucoup de sels peu solubles. On l'enlève ensuite au moyen de pompes de ces premiers bassins pour la conduire dans d'autres, où l'on recueille le sel marin, que l'on réunit en tas pour le laisser égoutter.

Voici la composition moyenne de l'eau de mer :

Chorure de sodium.	2,50
Chlorure de magnésium.	0,35
Sulfate de magnésie.	0,58
Carbonates de chaux et de magnésie. . .	0,02
Sulfate de chaux.	0,01
Eau.	96,54
	100,00

Il reste donc dans les eaux mères qui ont déposé le sel marin plusieurs sels utiles. On amène ces eaux mères dans des bassins, où elles se refroidissent pendant l'hiver : de tous les sels qui peuvent se former par double décomposition, le moins soluble est le sulfate de soude; il se forme donc par la double décomposition du chlorure de sodium et du sulfate de magnésie, et on le recueille.

Il se dépose ensuite un sulfate double de potasse et de magnésie, dont on se sert pour préparer le carbonate de potasse par la méthode de Leblanc. Il existe aussi des bromures, des iodures, que l'on arrive à recueillir pour préparer le brome et l'iode.

Silicates de potasse et de soude. — La potasse et la silice s'unissent en proportions variables : si la silice domine, le sel est peu soluble; si la potasse l'emporte, le sel est soluble.

Lorsqu'on soumet à une haute température un mélange de sable blanc pur, de carbonate de potasse et d'un peu de charbon, le carbonate est décomposé et il se forme un silicate de potasse qui fond ; refroidi, c'est un verre très-dur, mais qui est soluble dans l'eau; on l'appelle verre soluble, et pour le dissoudre, il faut le pulvériser.

La dissolution de verre soluble appliquée comme un vernis sur les matières inflammables telles que le bois, les protége et les rend incombustibles.

La soude et la silice s'unissent aussi en plusieurs proportions.

Ces silicates mélangés à des silicates terreux forment les verres. Les silicates alcalins sont attaquables par l'eau, à moins qu'ils ne contiennent un excès de silice, et alors ils sont presque infusibles.

Les silicates terreux ne sont pas attaquables à l'eau, mais demandent pour fondre des températures élevées, et tendent à cristalliser.

Le mélange des silicates terreux et alcalins est généralement plus fusible que le plus fusible des silicates qu'il renferme et il ne cristallise pas : c'est avec ce mélange qu'on fabrique les verres.

Verres. — Il y en a deux classes : 1° les verres ordinaires incolores à base de chaux et de potasse ou de soude ; 2° les verres colorés qui renferment outre la chaux, la potasse et la soude, de l'alumine et de l'oxyde de fer.

1° *Verres incolores.* — Les plus beaux sont les verres de Bohême, qui sont formés de silice, de potasse et de chaux bien pures. Les verres à base de potasse sont moins fusibles que ceux à base de soude et par suite plus difficiles à travailler, mais ils sont parfaitement transparents, tandis que les verres à base de soude ont toujours une couleur verdâtre que tout le monde a remarqué dans les verres à vitre.

En France le verre blanc se fabrique avec de la soude artificielle, de la chaux vive délitée et du sable quartzeux blanc. Dans les verres de qualité médiocre, on remplace la soude artificielle par un mélange de sulfate de soude et de charbon ; mais ces verres sont toujours un peu jaunes et sales.

C'est la silice qui rend le verre peu fusible : lorsqu'on veut avoir un verre infusible (gobeleterie ordinaire), l'oxygène des bases est le $\frac{1}{4}$ de l'oxygène contenu dans la silice. Pour les glaces, qui doivent être plus fusibles afin d'être coulées, il y a autant d'oxygène dans les bases que dans la silice.

Fabrication. — Les matières sont mélangées et calcinées dans un four où s'opère un commencement de combinaison ; cette opération est la fritte. Puis on fait tomber le mélange encore chaud dans des creusets en terre réfractaire placés

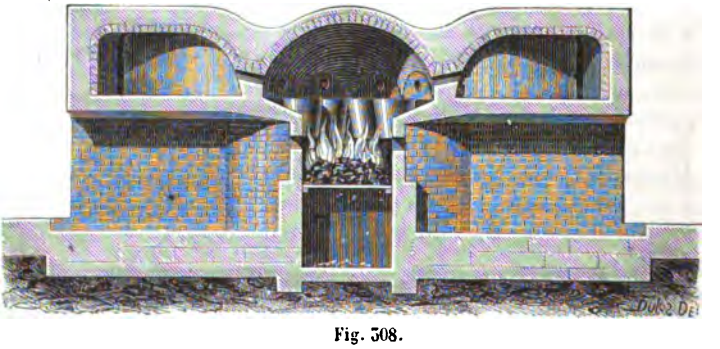


Fig. 308.

dans un four circulaire et que l'on chauffe jusqu'au rouge vif. On ajoute généralement à ce mélange un peu d'acide arsénieux qui, en se volatilisant, agite la masse et facilite l'affinage en cédant de l'oxygène aux corps à réduire. S'il y a quelque trace de fer, pour éviter la teinte de verre à bouteille, on ajoute au mélange un peu de silicate de manganèse qui oxyde le fer et le fait passer à l'état de sesquioxyde, dont la couleur est imperceptible. (Le silicate de manganèse s'appelle le savon des verriers.)

Avec sa canne en fer qui est creuse, l'ouvrier oueille dans le creuset une boule de verre, qu'il souffle, d'abord en tenant sa canne en l'air pour élargir la poire, puis en tenant sa canne vers le bas pour allonger la poire et la transformer en cylindre; pour enlever les bases du cylindre on enroule autour un fil de verre chaud qui produit une rupture immédiate; puis on pose le cylindre; sur une table, on le fend suivant une génératrice et on l'étend avec une baguette pour faire un verre à vitre.

2° Les bouteilles se fabriquent aussi par le soufflage, en introduisant la poire formée dans un moule en fonte où elle prend la forme convenable.

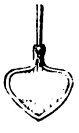


Fig. 309.

Fig. 310.

Fig. 311.

Fig. 312.

Fig. 313.

Voici en regard la composition du mélange destiné à la fabrication du verre à vitre et celle du mélange destiné à la fabrication des bouteilles :

COMPOSITION DES GLACES.		COMPOSITION DES BOUTEILLES.	
Sable très-blanc.	300	Sable ocreux.	100
Carbonate de soude sec.	100	Soude de varech.	40 à 60
Chaux éteinte à l'air.	43	Cendres non lessivées.	30 à 40
Calcin (verre cassé) ou rognures. . .	300	Cendres lessivées.	150 à 180
		Argile ocreuse.	80 à 100
		Calcin.	100 à 150

Les bouteilles verdâtres sont colorées par le protoxyde de fer; celles qui sont violettes renferment du sesquioxyde de manganèse.

Cristal. — Le cristal est un verre dans lequel la chaux est remplacée par de l'oxyde de plomb. C'est donc un silicate de potasse et de plomb. On se sert de sable blanc très-pur, et de carbonate de potasse raffiné; le protoxyde de plomb ou litharge renferme du plomb métallique et serait en partie réduit par le charbon et les matières organiques du mélange, on ne s'en sert pas et on recourt au minium (oxyde salin de plomb) qui jamais ne renferme de métal libre et qui, chargé d'un excès d'oxygène, réduit les matières organiques qui pourraient s'introduire dans le creuset. On se sert de creusets couverts, ayant une gueule dirigée vers l'ouvreau du four.

Fig. 314.

Autrefois on coulait le cristal dans des moules en cuivre ou en fonte, aujourd'hui on se sert de moules en bois qui n'altèrent point le poli du cristal. On taille ensuite le cristal d'abord avec une meule en fer, puis avec une meule en grès et enfin avec une meule en bois et de la pierre ponce.

Le strass est du cristal soigné, avec lequel on imite les pierres précieuses en le colorant par des oxydes métalliques :

L'oxyde de cobalt.	donne	le bleu saphir.
L'oxyde noir de cuivre.	—	le bleu céleste.
Le sesquioxyde de manganèse.	—	l'améthyste.
L'oxydule de cuivre.	—	le rouge pourpre.
Le sesquioxyde de chrome.	—	le vert végétal.
L'oxyde d'urane.	—	le jaune serin laiteux.
Le chlorure d'argent ou le charbon en poudre.	—	le jaune.

En ajoutant au cristal du bioxyde d'étain ou acide stannique, on le rend opaque et l'on obtient des émaux que l'on peut colorer par les oxydes précédents.

Le verre de Venise est fabriqué avec un moule cannelé, dans les cannelures duquel on introduit de l'émail, et au centre on met du cristal ; on étire le tout ensemble en donnant au moule un mouvement de rotation, de sorte que les fils d'émail s'enroulent en hélice autour du cristal, et l'on obtient le verre filigrané ou verre de Venise.

Le verre chauffé quelque temps au bain de sable finit par perdre une partie de son alcali et se dévitrifie c'est-à-dire devient opaque.

Le verre fondu plongé brusquement dans l'eau froide éprouve une trempe analogue à celle de l'acier ; il est cassant au delà de toutes limites et l'arrangement de ses molécules est d'une instabilité incroyable. Ainsi le verre fondu projeté par gouttes dans l'eau froide donne les larmes bataviques : si on en casse la pointe, aussitôt la masse entière tombe en poussière ; la fiole philosophique est un flacon refroidi brusquement et qui tombe en poussière lorsqu'on jette un petit caillou à l'intérieur.

Lorsque l'on veut se servir d'un verre refroidi brusquement, il faut le recuire c'est-à-dire le chauffer à une température plus ou moins élevée et alors il devient moins cassant.

Les verres et cristaux sont attaqués avec énergie par l'acide fluorhydrique ; les acides et les bases et même la vapeur d'eau les décomposent à la longue soit en enlevant les alcalins, soit en se substituant à eux.

CARACTÈRES DES SELS DE POTASSE ET DE SOUDE.

	Sels de potasse.	Sels de soude.
Acide tartrique.	Précipité blanc (bitartrate de potasse).	Pas de précipité.
Acide hydro-fluosilicique. . .	Précipité blanc gélatineux. . .	Pas de précipité.
Acide perchlorique.	Précipité blanc.	Pas de précipité.
Sulfate d'alumine (liqueurs concentrées).	Précipité blanc d'alun.	Pas de précipité.
Bichlorure de platine. . . .	Précipité jaune qui est un sel double de platine et de potassium.	Pas de précipité.
Au chalumeau.	Coloration violette dans la partie réduisante de la flamme.	Coloration d'un jaune vif.

Les sels de soude n'ont donc que des caractères négatifs. Aujourd'hui, il est facile d'en reconnaître la présence, même en proportion très-faible, au moyen de l'analyse spectrale. Nous avons vu en physique que le sodium donne dans le spectre solaire une raie caractéristique.

Baryum. Baryte. — La baryte (de *barus*, pesant) est un oxyde, lourd, très-avide d'eau, que l'on rencontre dans la nature à l'état de sulfate et de carbonate.

L'acide sulfurique décèle la présence d'une quantité minime de baryte en formant un sulfate de baryte, absolument insoluble. De même le chlorure de baryum permet de reconnaître des traces d'acide sulfurique.

Strontium. Strontiane. — La strontiane se rencontre dans la nature à l'état de sulfate et de carbonate.

Le sulfate de strontiane est moins insoluble que le sulfate de baryte.

Les sels de strontiane ont pour caractère distinctif de colorer en rouge pourpre la flamme de l'alcool; ce sont eux qui entrent dans la constitution des feux de bengale rouges.

Calcium. Chaux. — Le calcium, comme les métaux précédents se prépare par l'action d'une pile énergique sur la chaux ou le chlorure de calcium. C'est un métal d'un blanc jaune, très-ductile et très-brillant.

Chaux (CaO). — La chaux pure ou protoxyde de calcium est blanche et caustique, elle attaque les tissus animaux ; c'est une base énergique, infusible aux plus hautes températures.

Dans les laboratoires, la chaux pure se prépare en calcinant dans un creuset de terre, du marbre blanc ou du spath d'Islande (carbonate de chaux cristallisé).

L'acide carbonique se dégage et pour l'entraîner en dehors du creuset, on projette de temps en temps quelques gouttes d'eau qui font un courant gazeux.

Nous aurons lieu dans une autre section de traiter la fabrication des chaux usuelles.

La chaux préparée comme plus haut, est appelée chaux vive, elle est très-avide d'eau ; si on laisse tomber sur elle de l'eau goutte à goutte, elle se gonfle, et la température s'élève au point de pouvoir enflammer de la poudre ; des vapeurs se dégagent, et finalement la masse tombe en poussière. Cette poussière est la chaux hydratée CaO, HO ou chaux éteinte.

A l'air, la chaux vive absorbe l'acide carbonique et l'humidité et se transforme en un mélange de carbonate et d'hydrate $CaO,CO^2 + CaO, HO$.

L'hydrate de chaux abandonne facilement son eau par la chaleur et la chaux vive est régénérée.

En suspension dans l'eau, la poussière de chaux éteinte forme une masse laiteuse qu'on appelle lait de chaux.

L'eau dissout $\frac{1}{700}$ de son volume de chaux à 15°, et seulement $\frac{1}{1270}$ à la température de l'ébullition ; la chaux est donc plus soluble à froid qu'à chaud.

Les principaux sels de chaux sont le carbonate et le sulfate, dont nous aurons lieu de parler longuement dans d'autres sections de l'ouvrage.

Chlorure de chaux. — C'est un mélange d'hypochlorite de chaux CaO, ClO et de chlorure de calcium CaCl ; le chlorure de chaux est une poudre blanche amorphe, exhalant l'odeur de chlore. Il renferme presque toujours un excès de chaux libre. Ce chlorure est donc un sel double, et c'est à tort qu'on l'appelle chlorure, comme le chlorure de potasse ou eau de javelle et le chlorure de soude ou eau de Labarraque.

Le plus faible acide décompose l'hypochlorite, l'acide hypochloreux se dégage, mais rencontrant le chlorure de calcium il se décompose et donne de la chaux, tandis que tout le chlore se dégage.

$$CaO,ClO + Co^2 = CaO,Co^2 + ClO$$
$$ClO + CaCl = CaO + 2Cl$$

C'est à ce dégagement continuel de chlore que ce corps doit ses propriétés

décolorantes et désinfectantes ; on l'emploie au blanchiment des toiles et à l'assainissement des lieux infects. C'est une sorte de chlore solide et facilement transportable.

Le chlorure de chaux se prépare en disposant dans une caisse des couches peu épaisses de chaux bien éteinte et faisant arriver un faible courant de chlore, de manière à ne pas échauffer la masse.

Caractères des sels de chaux. — Ils donnent avec les carbonates alcalins un précipité blanc; pas de précipité avec l'ammoniaque ; précipité blanc avec l'acide sulfurique si les liqueurs sont concentrées ; précipité blanc caractéristique avec l'acide oxalique et les oxalates alcalins, le précipité se redissout dans l'acide azotique ; la potasse précipite la chaux quand les sels sont concentrés ; les sels de chaux colorent en jaune rouge la flamme de l'alcool.

Magnésium. Magnésie (Mg, MgO). — Le magnésium, métal blanc et éclatant comme l'argent, se prépare en décomposant le chlorure de magnésium par le potassium ; c'est un métal qui brûle à l'air, lorsqu'on l'enflamme, en donnant une lumière d'un éclat remarquable.

La magnésie, MgO, se prépare en décomposant par la potasse des sels magnésiens ; la magnésie précipitée se présente, après calcination, sous la forme d'une poudre blanche très-légère, infusible et très-peu soluble dans l'eau. C'est le contre-poison de l'arsenic ou acide arsénieux avec lequel elle forme un composé insoluble.

Le sulfate de magnésie est un purgatif qu'on trouve à l'état naturel dans les eaux de Sedlitz, de Pullna en Bohême et d'Epsom en Angleterre.

Le silicate de magnésie se rencontre en minéralogie sous diverses formes, auxquelles on a donné le nom de talc, péridot, écume de mer. Les roches anciennes renferment du pyroxène et de l'amphibole, qui sont des silicates doubles de chaux et de magnésie.

Il existe dans la nature de grandes masses de carbonate de magnésie, soit pur, soit mélangé au carbonate de chaux et il prend alors le nom de dolomie.

Caractères des sels de magnésie. — Précipités blancs avec les carbonates neutres alcalins, les alcalis (excepté l'ammoniaque), le réactif principal est le phosphate de soude, qui donne un précipité cristallin de phosphate ammoniaco-magnésien, pourvu qu'on ait d'abord versé dans la liqueur un sel ammoniacal ; fondu au chalumeau avec de l'azotate de cobalt, un sel de magnésie donne une perle de verre couleur chair.

Aluminium. Alumine (Al. Al^2O^3). — Grâce aux travaux de M. Deville, l'aluminium se prépare aujourd'hui en grande abondance. Wöhler le retira du chlorure d'aluminium qu'il décomposa par le potassium ; aujourd'hui, on l'extrait du chlorure double d'aluminium et de sodium que l'on traite par le sodium.

L'aluminium est blanc avec une teinte bleuâtre, très-malléable, très-ductile et très-sonore, bon conducteur de l'électricité. Il peut en bien des cas remplacer l'argent, et il a sur lui l'avantage de peser beaucoup moins à volume égal, puisque sa densité n'est guère supérieure à 2,5.

L'air et l'oxygène ne l'attaquent à aucune température ; l'eau ne l'oxyde qu'à une température très-élevée. Les acides sulfurique et azotique ne l'attaquent qu'au rouge ; l'acide sulfhydrique est sur lui sans action. L'acide chlorhydrique seul le dissout rapidement.

Le bronze d'aluminium, alliage de ce métal avec le cuivre, est léger et très-dur, mais très-cassant ; ce bronze est appelé à rendre de grands services à l'industrie.

Alumine. — L'alumine est très-répandue dans la nature ; le corindon, cristal

naturel incolore, est de l'alumine pure ; l'émeri, le rubis et le saphir sont formés d'alumine colorée par des oxydes métalliques. Unie à la silice, l'alumine forme les argiles, que certains oxydes viennent diversement colorer.

On prépare l'alumine hydratée en décomposant la dissolution de sulfate d'alumine par le carbonate d'ammoniaque : l'hydrate calciné donne l'alumine anhydre.

L'alumine hydratée est insoluble dans l'eau, mais soluble dans les alcalis ; toutefois, dans l'ammoniaque, la solubilité est faible.

L'alumine est très-difficilement fusible ; elle s'unit aux matières colorantes organiques, telles que le carmin, pour donner des laques, couleurs employées en peinture.

Aluns. — Les principaux sels d'alumine sont les aluns, dont le type est l'alun ordinaire, sulfate double d'alumine et de potasse.

$$Ko,So^3+Al^2O^3,3So^3+24Ho$$

Il se dépose sous forme d'octaèdres, lorsqu'on mélange des dissolutions concentrées de sulfate d'alumine et de sulfate de potasse.

L'alun calciné perd son eau de cristallisation, et par le dégagement de la vapeur, constitue une masse blanche poreuse. Cette masse calcinée donne l'alun caustique, qui est très-avide d'eau et qui peut s'employer à cautériser les chairs. On prépare l'alun : 1° par la calcination de l'alunite, qui est de l'alun renfermant un excès d'alumine ; on lessive après calcination, et on obtient de l'alun dit alun de Rome ; 2° par le grillage de schistes alumineux, imprégnés de pyrites de fer ; on reprend par l'eau, le sulfate de fer se dépose et le sulfate d'alumine reste dans la liqueur, que l'on mélange à une dissolution de sulfate de potasse.

Fig. 315.

L'alun ordinaire a pour isomorphes les aluns de fer, de chrome, de manganèse, qui ont la même formule que plus haut en remplaçant l'alumine Al^2O^3 par les oxydes Cr^2O^3, Fe^2O^3, Mn^2O^3.

Argiles et poteries. — On rencontre assez souvent dans la nature une roche appelée feldspath, qui est un silicate double de potasse et d'alumine : broyée et lavée par les eaux naturelles, cette roche a fini par se transformer en silicate d'alumine ou argile pure, qui porte le nom de kaolin et dont la formule s'approche de Al^2O^3, $Si\,O^3$,2HO. Généralement, l'argile ordinaire n'est pas pure, elle est colorée et salie par des matières étrangères, telles que du sable quartzeux, des carbonates terreux, de l'oxyde de fer, de l'oxyde de manganèse.

Les argiles pures (kaolin et argile plastique) se délayent avec l'eau et forment une bouillie, puis une pâte onctueuse facile à pétrir et susceptible de revêtir toutes les formes possibles ; c'est, en un mot, une matière éminemment plastique ; portées à une haute température, elles se dessèchent, se durcissent, en éprouvant une contraction ou retrait considérable, sans toutefois arriver à fondre ; l'argile ainsi desséchée est une masse poreuse et capillaire, qui happe à la langue à cause de sa tendance à absorber l'humidité.

Les argiles impures (argile figuline ou marne) renferment des calcaires et des oxydes métalliques qui les rendent fusibles à de hautes températures.

Pour fabriquer des vases avec les argiles, on les mélange à des substances dégraissantes ou ciments destinées à diminuer le retrait et, par suite, la déformation et le fendillement des pièces ; et on les recouvre d'un enduit fusible ou cou-

verte, qui prévient l'absorption des liquides par les pores de l'argile cuite.

Les poteries communes ou terres cuites sont formées d'une pâte argileuse, qui conserve sa porosité et que l'on revêt d'une couverte.

La poterie de luxe est de la porcelaine, dont la base est le kaolin; le kaolin est broyé et la poussière est agitée dans des cuves pleines d'eau, afin que les gros fragments tombent au fond; on décante, et en laissant reposer le liquide, on obtient le kaolin réduit en poudre fine. Pour rendre la pâte fusible, on ajoute au kaolin du feldspath, du carbonate de chaux ou du sable quartzeux; et le mélange se fait d'une manière intime, au moyen du marchage, opération qui consiste à faire pétrir la pâte par des hommes qui marchent dessus pieds nus. Enfin, on termine par le pourrissage, dans lequel la pâte subit une sorte de fermentation qui la débarrasse de toutes les matières organiques qu'elle pourrait renfermer.

La pâte faite et rendue homogène, on procède au façonnage des pièces, soit en les ébauchant à la main et au tour, soit en les coulant dans des moules, soit en les moulant par impression au moyen de matrices en plâtre.

C'est alors que l'on expose les pièces à l'air, et qu'on leur fait subir une première cuisson ou dégourdi; puis on applique à la surface l'enduit appelé couverte : la couverte est une sorte de verre, formé de silicate de potasse pour la porcelaine dure, et de silicate de potasse et de plomb (sorte de cristal très-fusible) pour la porcelaine tendre.

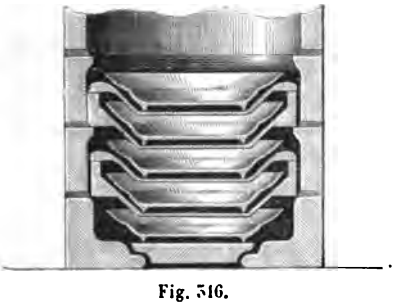


Fig. 516.

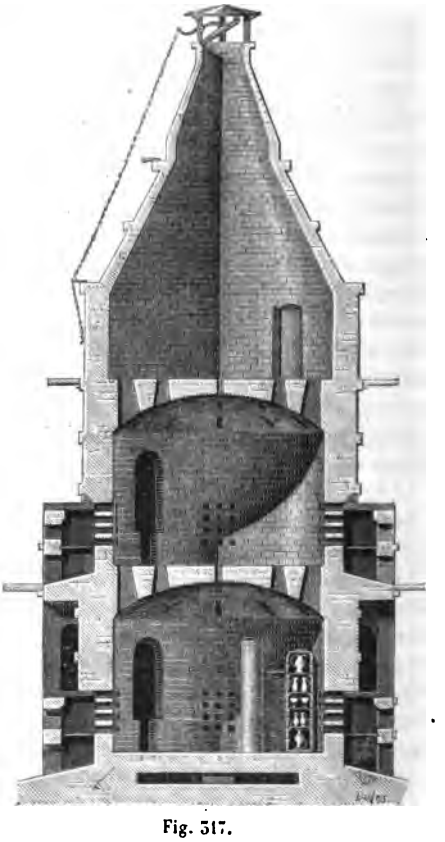


Fig. 517.

Sur la poterie commune, il faut appliquer un enduit opaque qui cache la pâte colorée; on ajoute aux verres précédents l'acide stannique, ce qui forme une espèce d'émail.

La pâte des terres cuites proprement dites (briques, tuyaux, etc...) est formée d'argile dégraissée par du sable, et ne reçoit pas d'enduit.

Les pièces préparées sont placées dans des supports spéciaux et empilées dans des cylindres ou cazettes; puis on enfourne ces cazettes. Les fours sont généralement à trois étages. L'étage supérieur sert à faire le dégourdi; dans les étages

inférieurs s'opère la vraie cuisson : les foyers sont latéraux à flamme renversée et c'est l'intérieur du four qui constitue la cheminée de tirage.

On décore les poteries avec des couleurs placées sous la couverte ou mêlées à la couverte ; ces couleurs sont formées d'oxydes inaltérables au feu et aux agents atmosphériques, et dont la dilatation est à peu près la même que celle de la pâte. On distingue les couleurs de grand feu : l'oxyde de cobalt pour les bleus, le sesquioxyde de chrome pour les verts, et l'oxydule d'uranium pour les noirs, et les couleurs moins résistantes, telles que le protoxyde de cuivre (vert), l'oxydule de cuivre (rouge), le pourpre de Cassius (violet et rouge).

Caractères des sels d'alumine. — Donnent avec la potasse et la soude un précipité soluble dans un excès de réactif, avec l'ammoniaque le précipité est presque insoluble ; avec le sulfate de potasse ou d'ammoniaque, il se précipite des cristaux d'alun. Au chalumeau, les sels d'alumine humectés d'azotate de cobalt donnent une perle bleue.

Manganèse. — Métal gris, d'aspect analogue à celui de la fonte. Ses propriétés chimiques sont analogues à celles du fer. C'est le premier exemple d'un métal formant un acide (l'acide manganique).

Fer. — Le fer du commerce, dont nous nous occuperons plus loin, n'est jamais pur : pour obtenir du fer pur, on coupe en morceaux des fils de fer que l'on réunit ensemble et que l'on oxyde par la vapeur d'eau au rouge ; on pulvérise grossièrement les fils oxydés et on les réduit par un courant d'hydrogène pur. Le fer divisé qu'on obtient, projeté dans l'air, s'y oxyde instantanément et s'enflamme.

Le fer pur est blanc, brillant, il est cristallisé soit en grains, soit en fibres ; le fer fibreux est très-tenace. Le fer fond à 1,600° ; à la chaleur blanche, il se ramollit et peut se souder à lui-même, on projette du sable quartzeux sur les deux bouts à souder afin d'absorber l'oxyde de fer qui se forme, et de le changer en silicate de fer fusible.

Le fer et le platine sont les seuls métaux qui se soudent à eux-mêmes sans l'intermédiaire d'une soudure étrangère.

Inaltérable à l'air sec, le fer se rouille à l'air humide, il se change en sesquioxyde ; on trouve toujours de l'ammoniaque dans la rouille ce qui prouve que l'oxydation se fait aussi aux dépens de l'eau.

Le fer s'oxyde au rouge, et le marteau détache des plaques d'oxyde noir connues sous le nom de battitures. Le fer est attaqué par les acides. Sa densité est 7, 8.

Protoxyde de fer (Fe O). — On ne le connaît qu'à l'état d'hydrate, précipité blanc que l'on obtient en versant de la potasse dans un sel de protoxyde de fer. De blanc le précipité passe rapidement au vert bouteille, puis au brun ; il est alors transformé complétement en sesquioxyde $Fe^2 O^3$ par l'absorption de l'oxygène de l'air.

Sesquioxyde de fer ($Fe^2 O^3$). — Il existe dans la nature, sous la forme de cristaux aplatis, d'un noir brillant, et on l'appelle fer oligiste, ou sous la forme de lames miroitantes, et on l'appelle fer spéculaire, ou bien encore sous la forme de masses rouges compactes (hématite ou sanguine).

Le sulfate de fer calciné donne comme résidu du sesquioxyde de fer désigné sous le nom de colcothar, et qui sert à polir les glaces et les métaux et à mettre les planchers en couleur.

En versant de la potasse et plutôt de l'ammoniaque dans un sel de sesquioxyde on obtient cet oxyde hydraté sous la forme d'un précipité brun rougeâtre.

Cet hydrate bouilli dans l'eau se transforme à la longue en une modification insoluble dans les acides.

Oxyde magnétique ($Fe^5 O^4$). — On en trouve en Suède des gisements considérables qui fournissent les aimants naturels. On peut l'obtenir artificiellement en oxydant le fer par la vapeur d'eau. En résumé, c'est un oxyde salin, c'est-à-dire un véritable sel ($Fe O, Fe^2 O^3$) dont le protoxyde est la base et le sesquioxyde est l'acide.

Acide ferrique ($Fe O^3$). **Autres composés de fer.** — Le soufre et le fer pulvérisés et mis en suspension dans l'eau se combinent énergiquement; la masse se boursoufle et l'on a ce que l'on appelle le volcan de Lemeri.

Les pyrites de fer magnétiques se rencontrent en grande abondance dans la nature, leur formule correspond à $Fe^7 S^8$.

Lorsqu'on distille en vase clos des matières animales, on obtient un charbon azoté qui, calciné avec du carbonate de potasse, donne un cyanure de potassium (KCy ou $KC^2 Az$); si l'on agite la masse avec un ringard de fer, il se forme en outre un cyanure de fer qui a pour formule $Fe Cy$ ou $Fe^3 Cy^3$, lequel forme avec le premier cyanure un sel double. On obtient ainsi :

1° Le cyanure double de fer et de potassium ($Fe Cy + KCy$) ou prussiate jaune de potasse ou encore ferrocyanure de potassium ;

2° Ou bien le cyanure double ($Fe^2 Cy^3 + KCy$) ou prussiate rouge de potasse ou encore ferricyanure de potassium.

Le sulfate de fer s'obtient par le grillage à l'air puis le lessivage des pyrites de fer ; c'est un sel, formant de beaux cristaux verts, connu sous le nom de couperose verte, soluble dans l'eau avec laquelle il donne une belle couleur verte ; il est employé en teinture, on prépare avec lui le colcothar, l'acide sulfurique de Nordhausen.

Caractères des sels de protoxyde de fer. — Ils sont blancs quand ils ne renferment pas d'eau, et verts lorsqu'ils sont hydratés : dissolutions vertes. La potasse et la soude donnent un précipité blanc qui verdit, puis brunit à l'air. L'ammoniaque donne un précipité blanc qui se redissout dans un excès de réactif ; l'acide sulfhydrique est sans action, et les sulfhydrates donnent un précipité noir. Le prussiate jaune ne donne pas de précipité, mais le prussiate rouge donne un beau précipité bleu, bien connu sous le nom de bleu de Prusse.

Caractères des sels de sesquioxyde. — Les sels anhydres de sesquioxyde sont bruns ; leur dissolution est jaune rougeâtre ; les alcalis donnent un précipité ocreux ; les carbonates alcalins donnent le même précipité ocreux avec dégagement d'acide carbonique ; l'acide sulfydrique donne un précipité de soufre, et les sulfhydrates des précipités noirs ; le prussiate jaune donne un précipité de bleu de Prusse et le prussiate rouge ne donne rien ; l'infusion de noix de galle donne un précipité noir (encre).

Chrome. — Métal gris d'acier, très-dur et très-brillant. Tous les sels de chrome sont colorés d'une manière remarquable.

Nickel et Cobalt. — Se préparent en réduisant les oxydes par l'hydrogène. Ils ont des propriétés analogues à celles du fer. Le nickel donne des sels verts ; le cobalt donne des sels rouges ou roses.

Cadmium. — Se rencontre toujours avec le zinc. Il a l'aspect de l'étain ; on ne l'a pas utilisé jusqu'ici. La sulfure de cadmium est une des plus belles couleurs jaunes connues.

Zinc. — Le zinc existe dans la nature à l'état de sulfure (blende) et de carbonate (calamine).

Le zinc du commerce renferme de nombreuses impuretés: fer, plomb, arsenic, carbone. On le purifie par distillation; ou bien on prépare le zinc pur en réduisant l'oxyde par le charbon.

Le zinc est un métal blanc bleuâtre; il est très-malléable vers 150° et se lamine parfaitement, mais à 200° il devient cassant. Il cristallise par refroidissement, fond vers 480° et distille à la chaleur blanche. Le zinc fondu a pour densité 6,86 et laminé 7,21.

Il s'oxyde à l'air, et sa surface se ternit; mais l'oxyde forme une couche protectrice qui empêche l'oxydation interne. Chauffé à l'air, le zinc s'enflamme, et les vapeurs déposent des flocons blancs d'oxyde de zinc.

Le zinc décompose la vapeur d'eau par la chaleur, et décompose l'eau en présence des acides; il se dissout dans la potasse et la soude en formant un sel dont l'oxyde de zinc est l'acide.

Oxyde de zinc (Zn O). — Quand le zinc brûle à l'air, la vapeur laisse déposer des flocons laineux d'oxyde anhydre (laine philosophique). On peut encore le préparer en réduisant par la chaleur l'azotate ou le carbonate de zinc.

L'hydrate s'obtient en le précipitant par la potasse de la dissolution d'un sel de zinc; il est soluble dans les alcalis.

L'oxyde préparé par la combustion du zinc à l'air est employé en peinture sous le nom de blanc de zinc à la place de la céruse ou blanc de plomb (carbonate de plomb); le blanc de zinc est bien moins coûteux que l'autre, ne noircit pas par l'acide sulfhydrique et les émanations sulfureuses, mais il s'allie moins bien à l'huile et donne une peinture moins solide.

Sels de zinc. — Le zinc se dissout dans l'acide chlorhydrique, et en condensant on obtient le beurre de zinc (chlorure de zinc), qui sert à former des bains-marie parce qu'à 400° il donne peu de vapeurs.

Le sulfate de zinc s'obtient en grillant la blende; c'est un sel blanc (vitriol blanc) isomorphe du sulfate de fer (vitriol vert) et du sulfate de cuivre (vitriol bleu).

Caractères des sels de zinc. — Ils sont incolores et donnent avec les alcalis un précipité blanc soluble dans un excès de réactif. Les carbonates alcalins donnent un précipité blanc d'hydro-carbonate. L'acide sulfhydrique ne donne rien, les sulfhydrates donnent un précipité blanc caractéristique.

Métallurgie du zinc. — Les deux sources du zinc sont le carbonate ou calamine et le sulfure ou blende. On grille ces minerais de façon à les réduire à l'état d'oxyde que l'on pulvérise et que l'on mélange intimement avec du charbon pour le réduire.

1° *Procédé per ascensum.* — En Belgique, à la Vieille-Montagne et en Silésie on introduit le mélange dans des cylindres de terre fermés à un bout et à l'autre bout desquels s'adapte un cône en tôle ouvert au sommet pour laisser dégager l'oxyde de carbone.

On dispose ces appareils dans un four; le zinc distille et vient se condenser dans le tube de tôle (*fig.* 320).

2° *Procédé per descensum.* — On met le mélange dans un vase en terre dont on lute exactement le couvercle; du fond du vase part un tube de fer fermé en haut par un bouchon de bois poreux. On chauffe, le bouchon se carbonise et laisse passer la vapeur de zinc qui se condense dans le tube de fer et le métal est recueilli dans un vase plein d'eau (*fig.* 319).

Étain. — L'étain (stannum) était connu dans l'antiquité; en effet, ses minerais sont très-faciles à réduire.

L'étain du commerce est généralement impur ; en le traitant par l'acide azotique on change l'étain en acide stannique insoluble et les autres métaux en azotates solubles. L'acide stannique calciné avec le charbon donne le métal pur.

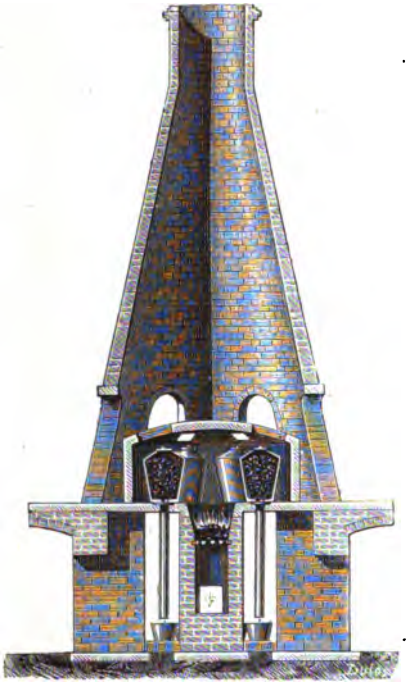


Fig. 318.

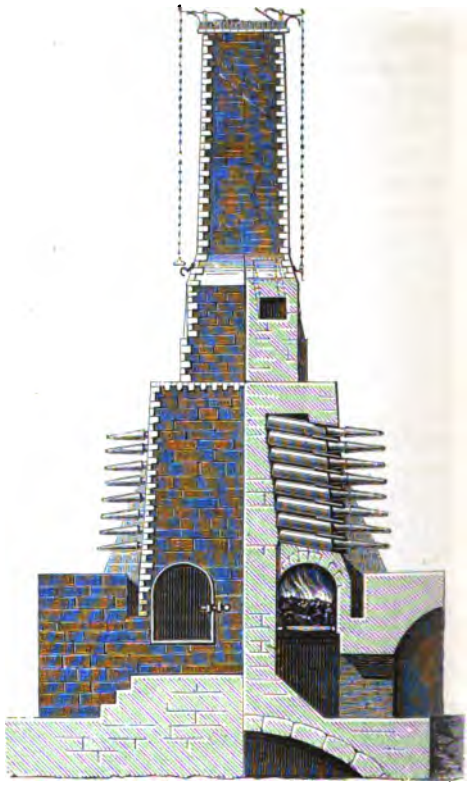


Fig. 319.

L'étain est d'un beau blanc, très-malléable et facile à réduire en feuilles minces avec lesquelles on enveloppe le chocolat, le thé, etc., il se moule parfaitement et on en fait des pots, des plats, des couverts.

Lorsqu'on ploie l'étain, il fait entendre un cri, que l'on explique par le frottement des cristaux déplacés ; il exhale une odeur caractéristique assez désagréable.

L'étain fond à 228°, donne des vapeurs au blanc ; il cristallise très-facilement par refroidissement lent, et donne des cubes ou des prismes à base carrée. Ayant une surface d'étain fondu, si on l'attaque par une eau régale faible, on enlève une couche très-irrégulière de la surface, on met à nu la cristallisation intérieure et on produit une sorte de moiré.

Au blanc, l'étain brûle dans l'air avec une flamme blanche.

L'étain est attaqué par les acides, il se dissout dans les alcalis, s'unit directement au soufre, chlore, phosphore, etc...

Acide stannique ($Sn\,O^2$). — L'acide stannique se présente sous deux formes isomères, l'acide stannique et l'acide métastannique qui jouissent de propriétés différentes et forment deux séries de sels. L'acide stannique est une poudre blanche

pesante que l'on obtient en versant de l'acide azotique sur de la grenaille d'étain ; la réaction est vive et il se dégage des vapeurs rutilantes.

Bisulfure d'étain (*or mussif, or de Judée*). — S'emploie en peinture et sert aussi à frotter les coussins des machines électriques. On l'obtient en décomposant la dissolution de bichlorure d'étain par l'acide sulfhydrique, on obtient un précipité jaune clair, susceptible de cristalliser en lames brillantes couleur d'or.

Métallurgie de l'étain. — Le minerai d'étain est tout simplement le bioxyde (SnO^2), mêlé à des pyrites de fer; on grille pour oxyder les pyrites, on pulvérise dans les bocards et par le lavage on enlève les sulfates et oxydes de fer. Reste l'acide stannique que l'on mélange intimement avec du charbon ; le mélange est introduit dans un creuset où l'air arrive en abondance par la buse d'une machine soufflante. Il se forme de l'oxyde de carbone qui réduit l'oxyde d'étain et le métal s'écoule dans un réservoir extérieur. On l'agite avec des branches de bois vert qui dégagent de nombreux gaz, mettent la masse en mouvement et rassemblent les crasses à la surface.

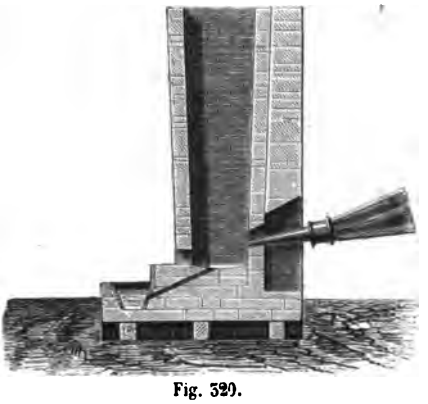


Fig. 529.

Le métal est enlevé avec des poches de fer pour être coulé.

Pour le raffiner, on échauffe le métal impur dans un four incliné ; l'étain pur fond d'abord, se dégage par liquation et s'écoule dans un réservoir.

Caractères des sels d'étain. — Les sels d'étain, étendus d'eau, donnent un précipité blanc, qui pour les sels de protoxyde est un sel basique insoluble et pour les stannates est de l'acide stannique.

Les alcalis donnent des précipités blancs, que redissout un excès de réactif dans le cas des sels de peroxyde (le peroxyde d'étain ou acide stannique est un acide faible qui joue le rôle de base avec les acides énergiques, et le rôle d'acide avec les bases puissantes).

L'acide sulfhydrique et les sulfydrates précipitent en brun marron les sels d'étain ; mais le précipité est lent à se former.

Antimoine. — Le sulfure d'antimoine se rencontre dans la nature sous la forme de prismes gris d'aspect métallique.

L'antimoine est un métal très-brillant, blanc à reflets bleus, très-cassant qui brûle dans l'air à la chaleur rouge, qui fond à 450°, et qui a des propriétés chimiques analogues à celles de l'étain.

L'antimoine s'allie aux autres métaux et il communique de la dureté aux alliages.

Il s'unit à l'hydrogène, et offre sous ce rapport des analogies avec le phosphore et l'arsenic.

Le trisulfure d'antimoine (SbS^3) se rencontre dans la nature; grillé à l'air, il se transforme en un mélange d'oxyde et de sulfure ou oxysulfure d'antimoine qui porte, suivant la longueur de l'opération et l'intensité de la chaleur employée les noms de verre d'antimoine, crocus ou foie d'antimoine.

Le kermès est aussi un oxysulfure d'antimoine.

Le trichlorure ou beurre d'antimoine est employé comme caustique et comme

mordant en teinture ; il attaque l'acier et le fer et dépose à leur surface une couche d'antimoine préservatrice de l'oxydation ; aussi l'emploie-t-on pour bronzer les armes.

L'émétique est un tartrate double d'antimoine et de potasse.

Bismuth. — Le bismuth se trouve à l'état natif dans la nature. On le purifie, et c'est alors un métal blanc rosé, facile à réduire en poudre ; sa densité est voisine de 10. Il cristallise très-facilement par fusion et refroidissement, et donne de beaux cubes à éclat irisé parce qu'ils sont recouverts d'une couche mince d'oxyde, laquelle produit le phénomène physique des anneaux colorés.

Le bismuth fond à 264°. Ses propriétés chimiques sont analogues à celles de l'étain.

Le bismuth s'enflamme dans le chlore, en donnant un chlorure qui, dissous dans l'eau pure se transforme en un oxychlorure qui est le blanc de perle.

L'azotate de bismuth s'obtient en traitant le bismuth par l'acide azotique ; ce sel, étendu d'eau, se transforme en un sous-azotate insoluble, qui est le blanc de fard.

Tous les sels de bismuth sont décomposés par un excès d'eau, et se dédoublent en un sel acide soluble et un sel basique insoluble.

Plomb. — Le plomb (saturne des anciens) existe dans la nature à l'état d'oxyde et surtout à l'état de galène ou sulfure. Pour débarrasser le plomb du fer, du cuivre et de l'argent qu'il renferme, on le traite par l'acide azotique ; le peroxyde de plomb reste seul et on le réduit par le charbon.

C'est un métal gris à reflets bleuâtres, très-mou et facile à rayer, très-malléable et facile à étirer, mais dépourvu de ténacité.

Densité 11,44, fond à 330°, et peut cristalliser par fusion, il se vaporise et s'oxyde à l'air.

L'eau pure, telle que l'eau de pluie attaque le plomb et forme de l'oxyde ainsi que du carbonate ; l'eau de source, de rivière, qui renferme des sels étrangers, surtout du sulfate de chaux n'attaque pas le plomb, aussi peut-on l'employer pour les tuyaux de conduite.

Sous-oxyde de plomb (Pb^2O). **Protoxyde de plomb.** (PbO). — On le prépare en calcinant l'azotate ou le carbonate et on l'obtient hydraté en précipitant un sel de plomb par un alcali. On peut l'obtenir encore en calcinant le plomb à l'air.

La litharge du commerce est de l'oxyde de plomb fondu, et le massicot de l'oxyde pulvérulent. On peut l'obtenir à l'état cristallisé, sous diverses formes isomères.

Le protoxyde de plomb s'unit à la chaux et donne une substance qui noircit les cheveux parce que le soufre de la matière organique forme avec le plomb un sulfure noir.

Le litharge du commerce est jaune ou rouge suivant qu'elle se refroidit brusquement ou lentement.

Bioxyde de plomb (PbO^2) **ou acide plombique.** — On l'obtient en traitant le minium ou oxyde salin 2 PbO, PbO^2 par l'acide azotique faible, puis on lave et l'azotate de protoxyde est entraîné. Reste l'oxyde puce de plomb, ainsi nommé pour sa couleur brune. Il absorbe l'acide sulfureux pour former du sulfate de plomb. Le bioxyde de plomb peut s'unir aux alcalis.

Minium ou oxyde salin (Pb^3O^4, = 2 PbO, PbO^2). — Dans l'étage supérieur d'un four à deux étages, on met du plomb qui par la chaleur se change en protoxyde pulvérulent ou massicot. On recueille le massicot et on le lave pour enlever les traces de plomb : puis on le porte à l'étage inférieur du four ; le mas-

sicot s'oxyde partiellement et se colore en rouge d'autant plus foncé que la température est plus longtemps maintenue. On remue la masse de temps en temps; et on fait subir au massicot plusieurs calcinations successives ; c'est pourquoi on distingue le minium un feu, le minium deux feux.

Le minium obtenu par la calcination du carbonate de plomb est d'un rouge pâle et on l'appelle mine orange.

Le minium est une couleur qui s'emploie comme première couche sur les fers, qui sert à fabriquer des papiers, de la cire à cacheter, et qu'on utilise surtout dans la fabrication du cristal. Le minium ne renferme presque jamais de métaux étrangers, il a cet avantage sur la litharge et de plus, par l'oxygène qu'il abandonne, il brûle les matières organiques.

La galène ou sulfure de plomb se rencontre dans la nature en cubes brillants gris bleuâtre ; il s'obtient en fondant ensemble du plomb et du soufre et la réaction est énergique.

Chlorure de plomb. — On l'obtient en traitant la litharge par l'acide chlorhydrique. Fondu et refroidi, il donne une masse incolore et translucide que les alchimistes appelaient plomb corné.

Le chlorure se combine avec le protoxyde et l'on obtient des oxychlorures jaunes, tels que le jaune minéral et le jaune de Cassel.

Sulfate de plomb. — On le rencontre dans la nature ; il se prépare par double décomposition et on l'obtient comme résidu dans les teintureries quand le sulfate d'alumine agit sur l'acétate de plomb.

Le *chromate de plomb*, ou plomb rouge, existe dans la nature sous la forme de beaux cristaux d'un jaune orangé, qui donnent une poussière jaune.

On l'obtient en versant du chromate de potasse dans l'acétate neutre de plomb. En peinture, on l'appelle jaune de chrome (PbO, CrO^3).

Acétates de plomb. — Dans un vase plat renfermant du vinaigre pur, on fait baigner en partie des lames de plomb : la partie non baignée s'oxyde à l'air, on retourne la lame pour dissoudre l'oxyde, et ainsi de suite.

La liqueur abandonne des cristaux d'acétate neutre, à saveur sucrée puis astringente. L'acétate neutre bouilli avec la litharge donne un acétate sesquibasique ($3\,PbO, 2\,C^4\,H^3\,O^3$), dont la dissolution dans l'eau constitue l'extrait de saturne, lequel, étendu d'eau, donne un précipité blanc d'acétate plus basique encore.

Carbonate de plomb, blanc de plomb ou céruse (PbO, CO^2). — Il se rencontre dans la nature en cristaux blancs et on peut le préparer en versant un carbonate alcalin dans un sel de plomb ; c'est une poudre blanche insoluble dans l'eau. Préparation industrielle :

1° *Par le procédé de Clichy.* — Dans une dissolution d'acétate tribasique de plomb ($3\,PbO, C^4\,H^3\,O^3$) on fait arriver un courant d'acide carboniqne CO^2 produit par la cuisson de la craie ; il se dépose du carbonate de plomb, et il reste dans la liqueur un acétate moins basique, qui digéré avec de la litharge, reproduit l'acétate tribasique. Il y a toujours quelques pertes d'acide acétique.

2° *Par le procédé hollandais.* — Au fond d'un pot de grès on met de mauvais vinaigre, et sur un rebord que possède le pot intérieurement on dépose soit une feuille de plomb roulée en spirale, soit une grille de plomb. Dans une fosse artificielle, on place des couches alternatives de pots ainsi préparés et de fumier, en ménageant l'accès de l'air dans la masse. Le fumier fermente, la masse s'échauffe, le vinaigre s'évapore et forme avec le plomb oxydé un acétate basique que vient décomposer l'acide carbonique de la fermentation ; au bout de quatre ou cinq

semaines, on retire les feuilles de plomb et par le grattage on enlève la céruse formée. Elle est toujours un peu jaunie à cause de l'acide sulfhydrique dégagé.

La céruse donne une couleur d'un blanc pur, qui est très-opaque même en

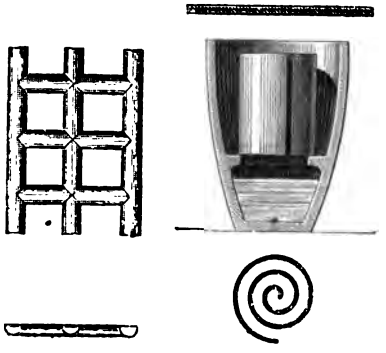


Fig. 321.

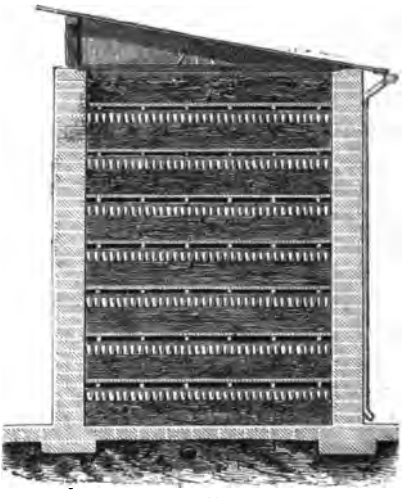


Fig. 322.

couche mince, et qui fait disparaître la teinte jaune de l'huile, aussi la mélange-t-on à presque toutes les autres couleurs ; elle est meilleure que le blanc de zinc, mais c'est un poison violent comme tous les sels de plomb, dont la fine poussière absorbée par la respiration donne les coliques de plomb.

Caractères des sels de plomb. — Les sels basiques ont une belle couleur jaune ; saveur sucrée ; les sulfates alcalins donnent un précipité blanc insoluble de sulfate de plomb : les sulfures, acide sulfhydrique et sulfhydrates, donnent un précipité noir caractéristique. Chauffés au chalumeau sur un charbon, les sels de plomb donnent un globule métallique.

Métallurgie du plomb. — Le plomb s'extrait de son sulfure ou galène, et cela, par deux méthodes différentes, suivant que la galène est pure ou enfermée dans une gangue siliceuse :

1° *Galène pure. Méthode par réaction.* — Sur la sole d'un four à réverbère déprimé en son milieu, on étend une couche de galène que l'on grille pendant quelques heures au rouge sombre. On agite la masse avec des ringards en fer et l'on a un mélange de sulfure (PbS), d'oxyde (PbO) et de sulfate ($PbO\ SO^3$). On ferme toutes les portes et on donne un coup de feu : il se forme du plomb et il se dégage de l'acide sulfureux.

$$PbS + 2PbO = SO^2 + 3Pb \qquad PbS + PbO,SO^3 = 2SO^2 + 2Pb.$$

Il y a aussi formation d'un sous-sulfure très-fusible (Pb^2S,) qui forme une matte qu'on recueille et qu'on grille de nouveau. C'est ainsi qu'on opère à Poullaouen en Bretagne et en Angleterre (*fig.* 323).

2° *Galène à gangue siliceuse.* — Méthode par réduction. Avec le procédé précédent, on obtiendrait un silicate non réductible par le sulfure. On mélange le minerai avec de la grenaille de fer, qui, par la chaleur, décompose le sulfure ($PbS + Fe = FeS + Pb$) ; le fer s'empare, en outre, de la silice pour former une

scorie fusible. On introduit le mélange avec des couches de combustible dans un fourneau, qui reçoit l'air par une machine soufflante ; à la partie inférieure est un

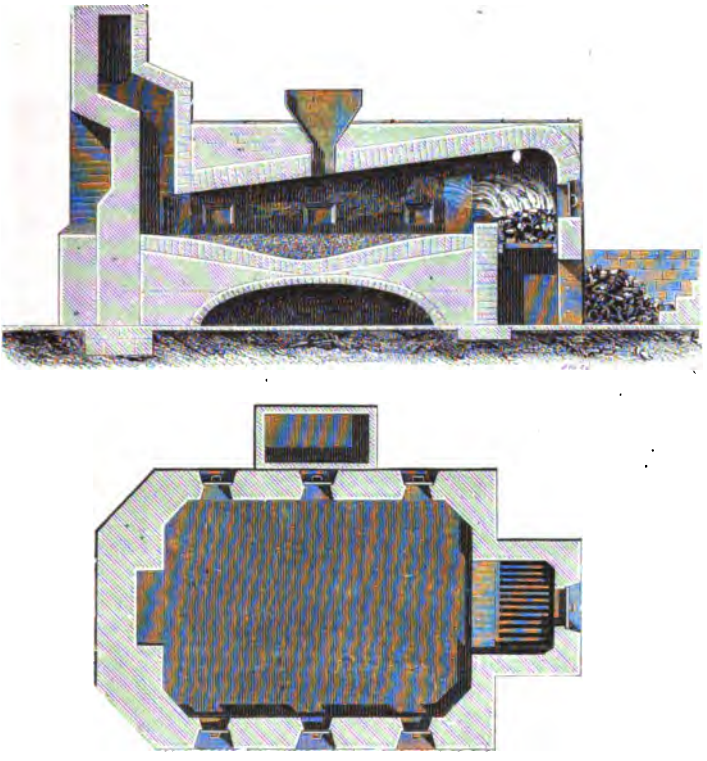


Fig. 323.

canal, et les matières liquides s'écoulent dans un creuset extérieur. On a du plomb et des sous-sulfures ou mattes que l'on traite ultérieurement.

Plomb argentifère. — Le plomb renferme toujours de l'argent, mais il n'y a avantage à l'extraire qu'autant que le plomb contient 1/5000 d'argent. On opère par coupellation : la sole du fourneau est une calotte sphérique en briques réfractaires que l'on recouvre d'une couche de marne bien pilonée, imperméable à la litharge fondue. Le couvercle est en tôle et peut se manœuvrer par une poutre formant un levier presque en équilibre indifférent. Un foyer latéral sert à fondre le métal, qui s'oxyde en se couvrant d'abord de matières noires impures qu'on enlève, puis de litharge que l'on fait écouler à mesure en entaillant la coupelle de marne. Deux soufflets lancent l'air à la surface du plomb fondu, et la chaleur de la réaction suffit seule à maintenir le métal à l'état liquide. Au fond de la sole, reste finalement de l'argent presque pur. La litharge recueillie est vendue au commerce ou réduite par le charbon pour avoir du plomb (*fig.* 325).

En 1861, on a fabriqué plus de deux millions de quintaux de plomb, lequel vaut en moyenne 50 francs le quintal.

Cuivre. — Le cuivre existe en cubes à l'état natif, mais on le rencontre plus souvent à l'état d'oxyde, de sulfure et d'arséniure. Le cuivre est presque toujours mêlé de fer ; pour avoir ce métal pur, on plonge dans une dissolution d'un de ses

sels une lame de fer, sur laquelle le cuivre se dépose à l'état de poussière rouge que l'on recueille; ou bien encore on réduit l'oxyde de cuivre par l'hydrogène.

C'est un métal rouge, susceptible de recevoir un beau poli, très-malléable et

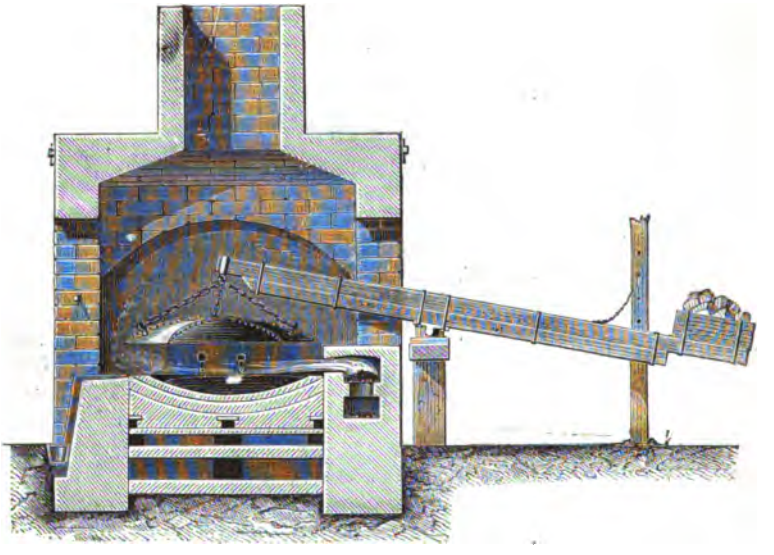


Fig. 324.

très-résistant. Densité 8,9. Il émet des vapeurs vertes à une température très-élevée. L'air sec est sans action sur lui à la température ordinaire; au rouge, il produit un oxyde noir; l'air humide produit le vert-de-gris, mélange d'hydrate et de carbonate de protoxyde de cuivre (la surface une fois vert dégrisée, la décomposition s'arrête).

Les acides organiques oxydent facilement le cuivre.

Oxydule de cuivre (Cu^2O). — Il forme dans la nature des masses d'un beau rouge, et même des cristaux rouges très-beaux, lorsqu'ils sont transparents. L'oxydule a tendance à s'oxyder et à se transformer en protoxyde (CuO).

Protoxyde de cuivre (CuO).— Au rouge, le cuivre se recouvre d'une couche noire de protoxyde que l'on prépare plus souvent en calcinant l'azotate ou l'acétate. En versant lentement une dissolution de sel de cuivre dans la potasse, on obtient un précipité bleu cendré d'hydrate facilement altérable. Il est soluble dans les acides et aussi dans l'ammoniaque, avec laquelle il donne ce liquide bleu céleste qui remplit les bocaux destinés à orner la boutique des pharmaciens.

Sulfure de cuivre. — Le sous-sulfure (Cu^2S) se produit, lorsqu'on fait fondre du soufre avec de la limaille de cuivre, il y a effervescence et l'on obtient un corps noir. Il existe dans la nature, mélangé le plus souvent à du sulfure de fer et s'appelle pyrite de cuivre, ou cuivre panaché. Le sulfure (CuS) est le précipité noir qu'on obtient en précipitant un sel de cuivre par l'acide sulfhydrique; la chaleur le réduit en soufre et sous-sulfure (Cu^2S).

Sulfate de cuivre. — On l'obtient, en traitant le cuivre par l'acide sulfurique concentré,

$$Cu + 2(SO^3,HO) = CuO,SO^3 + 2HO + SO^2$$

Dans l'industrie, on chauffe les vieilles plaques de doublage des navires, dans des fours où l'on projette du soufre; il se forme un sulfure, que l'on oxyde en laissant arriver l'air; il se change en sulfate que l'on recueille par lessivage. On obtient une dissolution d'une belle couleur bleue, qui, par refroidissement, abandonne de superbes cristaux de vitriol bleu isomorphes au sulfate de fer (vitriol vert) et au sulfate de zinc (vitriol blanc).

Le sulfate de cuivre est employé dans la teinture; dans la galvanoplastie, c'est lui qui donne le dépôt de cuivre. Il sert à chauler le blé, c'est-à-dire à détruire les germes de pourriture, et, en effet, c'est un poison, un antiseptique énergique; on l'emploie encore à l'injection des bois.

Carbonates de cuivre. — A Chessy, près Lyon, on trouve un hydrocarbonate bleu foncé ($2CuO,CO^2+CuO,HO$), qui, pulvérisé, donne le bleu céleste, connu sous le nom de cendres bleues ou bleu de montagne.

Il existe encore sous la forme de masses compactes, cristallisées en prismes d'une superbe couleur verte; c'est la malachite de Sibérie dont on a pu admirer des blocs énormes à la dernière exposition, et qui sert à faire des objets d'ornement de grande valeur.

Arsénite de cuivre. — En précipitant le sulfate de cuivre par l'arsénite de soude, on obtient un beau précipité vert, dit vert de Scheele.

Si l'on fait bouillir l'acide arsénieux avec l'acétate de cuivre, on obtient un précipité vert superbe, mélange d'arsénite et d'acétate de cuivre, qu'on appelle vert de Schweinfurth. C'est à ces couleurs vertes employées dans les papiers de tenture, qu'il faut attribuer les indispositions produites par le séjour dans certaines chambres.

Caractères des sels de cuivre. — Leurs dissolutions sont bleues. La potasse et la soude précipitent les sels d'oxydule en jaune orange, et les sels de protoxyde en bleu gris. L'ammoniaque précipite les sels de protoxyde en bleu, mais un excès redissout le précipité et l'on obtient une belle liqueur bleue.

L'acide sulfhydrique et les sulfhydrates donnent des précipités noirs. Le prussiate jaune de potasse donne dans les sels de protoxyde un précipité marron caractéristique.

Le fer, le zinc, précipitent le cuivre; aussi recommande-t-on, dans les empoisonnements par des sels de cuivre, de prendre de la limaille de fer.

Métallurgie du cuivre. — On ne trouve que peu de cuivre natif.

Il existe au Pérou des mines considérables de carbonate et d'oxydule, qu'il suffit de réduire par le charbon dans des fourneaux à cuve pour obtenir du cuivre pur.

Notre minerai européen est formé, soit du sulfure de cuivre, soit de pyrites, c'est-à-dire du sulfure double de cuivre et de fer.

Lorsqu'on a du sulfure simple, on le grille à l'air, il se dégage de l'acide sulfureux, et il reste de l'oxyde qu'on réduit par le charbon dans un fourneau.

Le traitement des pyrites est plus long, et il est basé sur ceci : le fer est plus avide d'oxygène que le cuivre, le cuivre plus avide de soufre que le fer, et l'oxyde de fer s'unit facilement à la silice pour former un silicate fusible. On grille la pyrite, il se dégage de l'acide sulfureux, et il reste un mélange de sulfures et d'oxydes de fer et de cuivre que l'on mélange avec des matières siliceuses, et on porte le tout à une très-haute température.

L'oxyde de fer s'unit à la silice; l'oxyde de cuivre décompose le sulfure de fer et il se forme de l'oxyde de fer qui s'unit à une autre partie de la silice, et du sulfure de cuivre qui se joint au sulfure de cuivre non décomposé.

Ainsi l'on obtient une scorie formée de silicate de fer, et dans le fourneau reste un sulfure de cuivre impur ou première matte cuivreuse. Les premières mattes sont grillées à leur tour, puis chauffées avec de la silice et perdent encore une partie du fer qu'elles renferment. On obtient une seconde matte cuivreuse, très-riche en sulfure de cuivre et très-pauvre en fer. On condense ainsi le minerai, jusqu'à ce qu'on obtienne du cuivre impur, appelé cuivre noir, qui renferme 95 p. 100 de métal pur.

Le raffinage se fait dans un four à reverbère : le cuivre noir est fondu et on projette à sa surface le vent de plusieurs tuyères ; le fer, le plomb, le soufre s'oxydent les premiers et on fait écouler les crasses et scories ; puis il se forme un

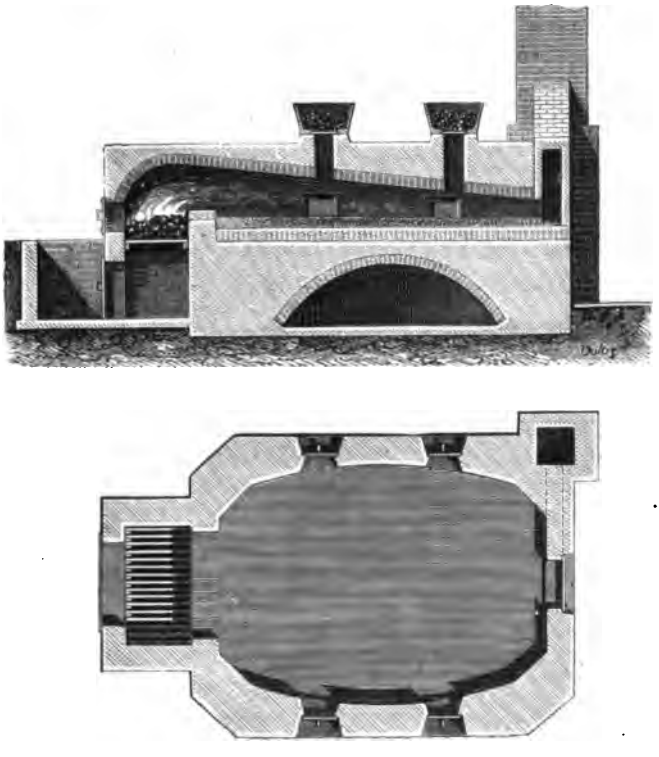


Fig. 325.

peu d'oxydule, et la scorie devient rouge. On arrête alors et on coule le métal dans un réservoir ; on jette de l'eau sur ce réservoir, la surface se solidifie et on enlève avec des crocs des plaques de cuivre rouge, qu'on appelle rosettes ; ces plaques renferment beaucoup d'oxydule de cuivre.

Quelquefois, au lieu d'un four à réverbère on se sert d'un petit fourneau ou creuset brasqué ; la brasque est un mélange réfractaire, formé d'argile et de charbon en poudre.

Lorsqu'on a les rosettes, il faut en réduire l'oxydule ; on les fait fondre dans un creuset et on recouvre la surface liquide de charbons qui décomposent l'oxydule ; dès que l'opération est terminée, il faut couler le cuivre, et il est très-important

de choisir le bon moment, sans quoi le cuivre dissoudrait du charbon qui le rendrait cassant et l'opération serait à recommencer.

Quand le cuivre renferme de l'argent, on le mélange avec du plomb qui s'empare de l'argent ; le plomb est beaucoup plus fusible que le cuivre, on l'en sépare par liquation et l'on obtient l'argent par coupellation.

En 1861, la production du cuivre a été de plus de 400 millions de quintaux, et le prix moyen est de 250 fr. le quintal.

Mercure.— Le mercure (vif argent, argent liquide ou hydrargire des anciens), se rencontre à l'état natif, à l'état de chlorure, et surtout à l'état de sulfure rouge ou cinabre. Le mercure renferme quelques impuretés ou métaux étrangers. On le purifie, en le filtrant à travers une peau de chamois, en le distillant et en l'agitant avec de l'acide nitrique faible.

C'est un métal liquide, que l'on solidifie à — 40° ; il ressemble alors à l'argent, il est malléable et on peut en frapper des médailles.

Densité à 0°, 13,6 ; bout à 350°. Il émet des vapeurs même à 0°, car une feuille d'or placée au-dessus d'une cuve de mercure à cette température se recouvre d'un amalgame. Le mercure liquide se divise facilement en globules sphériques, à moins qu'il ne soit impur, et alors il s'attache aux vases, on dit qu'il fait la queue.

Mélangé aux corps gras, le mercure semble s'y dissoudre et se convertit en une substance noire.

Le chlore attaque le mercure à froid ; et à l'ébullition, le mercure brûle dans le chlore.

L'expérience de Lavoisier nous a montré l'action de l'oxygène sur le mercure.

Les acides sulfurique et azotique concentrés attaquent le mercure.

Oxydule de mercure (Hg^2O). — Précipité vert noirâtre qu'on obtient en versant lentement une dissolution d'un sel d'oxydule dans de la potasse.

Protoxyde de mercure (HgO). — Lavoisier le prépara en faisant bouillir le mercure à l'air, il a l'aspect de la brique pulvérisée ; préparé par la calcination de l'azotate de mercure, il est d'un rouge franc. Enfin, en précipitant par la potasse un protosel de mercure, on a une poudre jaune.

Le protoxyde de mercure forme avec l'ammoniaque un composé qui est une base énergique.

Sulfures de mercure. — Le sulfure (Hg^2S) est le précipité noir qu'on obtient en versant l'acide sulfhydrique dans un sel d'oxydule.

Le protosulfure (HgS) s'obtient en précipitant un protosel par l'acide sulfhydrique, c'est un précipité noir pulvérulent, qui, chauffé dans une cornue, se sublime et se condense dans le col de la cornue en donnant des fibres violettes, c'est le cinabre qu'on trouve dans la nature. En grandes masses, le cinabre prend une teinte plutôt rouge que violette.

Le vermillon est un sulfure de mercure préparé par voie humide.

Chlorures de mercure. — Le sous-chlorure (Hg^2Cl) se prépare en chauffant dans une fiole un mélange de sel marin et de sulfate d'oxydule.

$$Hg^2O,SO^3 + NaCl = NaO,SO^3 + Hg^2Cl.$$

Le sous-chlorure vient par sublimation cristalliser dans le col de la fiole ; il faut avoir soin que le sulfate d'oxydule ne renferme pas un peu de sulfate de protoxyde, parce qu'au lieu d'obtenir le sous-chlorure pur ou calomel, qui est un simple purgatif, on obtiendrait aussi du protochlorure HgCl, c'est-à-dire du sublimé corrosif, poison violent.

Le sublimé corrosif (HgCl), s'obtient de plusieurs manières, entre autres par l'action du sel marin sur le sulfate de mercure.

$$NaCl + HgO,SO^3 = HgCl + NaO,SO^3$$

C'est un toxique énergique, que l'on emploie pour conserver les préparations anatomiques, et pour injecter les bois.

Fulminate de mercure. — C'est un composé ayant pour base le protoxyde de mercure et pour acide un acide spécial appelé acide fulminique ; le fulminate affecte la forme de cristaux blancs jaunâtres, qui détonent avec énergie soit par la chaleur, soit par le choc. On le prépare en faisant bouillir ensemble du mercure, de l'acide azotique et de l'alcool ; le fulminate se dépose au fond du vase.

Iodure de mercure. — Précipité d'un beau rouge que l'on obtient en versant un iodure alcalin dans un sel de protoxyde.

Caractères des sels de mercure. — Outre les caractères que nous avons rencontrés dans l'étude précédente, il en est un plus simple qui consiste à réduire par la chaleur au moyen du chalumeau les sels de mercure placés dans la cavité d'un charbon ardent. On obtient le métal qu'il est facile de reconnaître.

Métallurgie du mercure. — Le minerai du mercure est le cinabre, ou sulfure.

1° A Almaden, en Espagne, on place le minerai dans un four vertical sur une

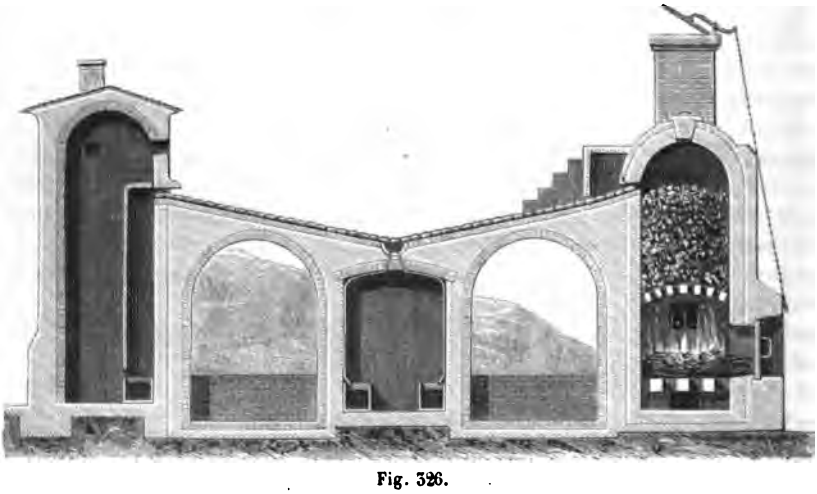


Fig. 326.

voûte à claire-voie que traverse la flamme du foyer ; le minerai est grillé et se change en acide sulfureux et mercure.

$$HgS + 2O = SO^2 + Hg$$

Le mercure passe dans une série de bouteilles en grès, dont le col de l'une s'engage dans le fond de la suivante, il se condense et se rend dans la rigole centrale d'où il tombe dans une chambre. La vapeur mercurielle qui échappe remonte le tube incliné formé par une autre série de bouteilles, s'y condense en partie, et la condensation s'achève dans la chambre de gauche. Les bouteilles ou allonges en terre s'appellent aludels.

2° A Idria près de Trieste, les aludels sont remplacés par une série de chambres de condensation que parcourt la vapeur mercurielle.

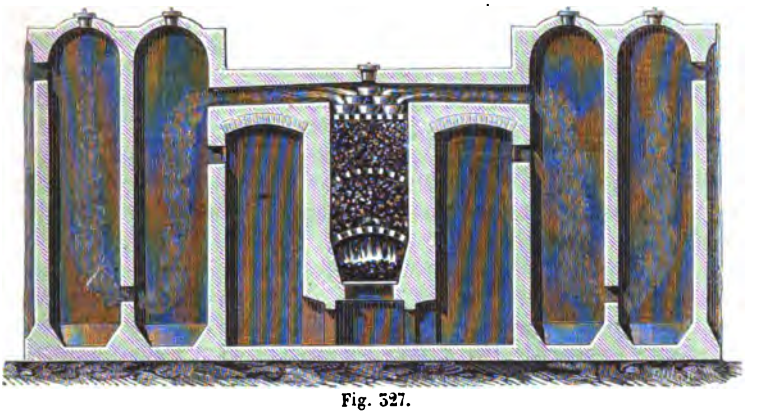


Fig. 527.

3° Dans le duché de Deux-Ponts, on exploite un minerai à gangue calcaire ; on le grille dans une cornue et le mercure se condense dans l'allonge et un récipient.

$$4HgS + 4(CaO,CO^2) = 4CO^2 + CaO,SO^3 + 3CaS + 4Hg.$$

Argent. — L'argent (*argos*, blanc) est un métal d'un beau blanc, susceptible de recevoir le poli le plus brillant, très-malléable et très-ductible, fond vers 1000° et peut par le refroidissement cristalliser en octaèdres : à une température très-élevée, il émet des vapeurs vertes.

L'argent est inaltérable à l'air ; fondu, il absorbe l'oxygène de l'air et peut en prendre jusqu'à 22 fois son volume ; si l'on plonge le métal dans l'eau, aussitôt le gaz se dégage avec effervescence.

L'acide chlorhydrique attaque peu l'argent ; l'acide sulfurique l'attaque à l'aide de la chaleur ; l'acide azotique l'attaque toujours, de même l'acide sulfhydrique qui le noircit par la formation d'un sulfure. Le sel marin attaque l'argent et forme du chlorure d'argent.

Protoxyde d'argent (AgO). — C'est un corps pulvérulent, couleur olive ; base très-énergique, quoique peu stable à l'état isolé. Il est soluble dans l'ammoniaque et par évaporation il se dépose une poudre noire, éminemment détonante qu'on appelle fulminate d'argent.

Sulfure d'argent. — On le rencontre dans la nature sous forme d'octaèdre. Il forme des sels avec d'autres sulfures, c'est ainsi que l'on rencontre des cristaux de sulfure double d'argent et d'antimoine ou d'arsenic.

$$3AgS,Sb^2S^3 \text{ ou } 3AgS,AsS^3$$

Chlorure d'argent. — Cristaux naturels cubiques, fond à 400°, et donne par le refroidissement une masse transparente que les anciens chimistes appelaient Diane cornée (Diane était le nom de l'argent). On l'obtient en précipitant un sel d'argent par l'acide chlorhydrique, sous la forme de lait caillé, blanc, très-pesant, insoluble dans les acides et dans les alcalis, sauf l'ammoniaque dans laquelle il est très-soluble ; à la lumière diffuse, le chlorure de blanc devient bleu, violet et enfin noir. Son insolubilité dans l'eau est absolue.

Azotate d'argent ($AgOAzO^5$). — On attaque l'argent par l'acide azotique et la liqueur dépose des cristaux d'azotate d'argent. Coulé dans un moule sous forme de crayon, il constitue la pierre infernale, que les médecins emploient pour brûler les chairs. L'azotate est blanc, mais presque toujours noir à la surface par suite d'un commencement de décomposition qui a déposé de l'argent en poussière impalpable. L'azotate d'argent se décompose du reste très-facilement à la lumière, et le goulot des flacons qui le renferment est toujours comme charbonné ; c'est pourquoi il sert à marquer le linge.

On peut le préparer en attaquant la monnaie par l'acide azotique ; on obtient un mélange d'azotates d'argent et de cuivre qu'on évapore et qu'on chauffe jusqu'à fusion ; l'azotate de cuivre se décompose, l'azotate d'argent reste seul et on le reprend par l'eau.

Alliages d'argent. — Dans un verre à pied on verse du mercure et au-dessus de l'azotate d'argent, on voit se développer dans la liqueur des rameaux, des espèces de branchages formés de cristaux accolés; ces cristaux, connus sous le nom d'arbre de Diane, sont un alliage de mercure et d'argent, c'est-à-dire un amalgame d'argent.

Le seul alliage usuel est celui qui sert à la monnaie, à la vaisselle et aux bijoux : Voici le titre légal de ces alliages :

900 d'argent 100 de cuivre 1000	Pour la grosse pièce d'argent.	837 163 1000	Pour la monnaie divisionnaire, dont la valeur nominale est au-dessous de la valeur réelle.
950 d'argent 50 de cuivre 1000	Médaille. Vaisselle. Argenterie.	800 d'argent 200 de cuivre 1000	Bijouterie.

Il y a au contrôle une tolérance de $\frac{2}{1000}$ pour les monnaies, $\frac{5}{1000}$ pour le reste.

Essai par coupellation. — Dans une petite capsule poreuse, faite avec de la poudre d'os on met un gramme d'argent à essayer, enveloppé dans une feuille de plomb pesant dix grammes. On place la capsule dans un moufle qu'entoure le charbon incandescent d'un four à coupellation. L'air peut s'introduire, le plomb, le cuivre, tous les métaux étrangers s'oxydent, quand l'argent fondu n'est pas altéré ; la litharge dissout les autres oxydes, et est absorbée par la coupelle poreuse. Reste un bouton d'argent que l'on pèse. Cette méthode d'essai n'est jamais très-exacte (*fig.* 329).

Essai par voie humide. — On dissout la pièce de monnaie ou d'orfévrerie, ou seulement un fragment de cette pièce ayant un poids connu, dans l'acide azotique, et l'on précipite par une dissolution de chlorure de sodium que contient une burette graduée. Du nombre de divisions qu'il faut verser, on conclut la proportion d'argent qui existe dans l'objet ; le chlorure d'argent formé est complétement insoluble, et l'on s'arrête quand une goutte de chlorure de sodium ne produit même plus un nuage dans la liqueur. Le poids de l'objet à essayer sur lequel on opère, a été calculé au moyen des équivalents, de telle sorte que, si c'était de l'argent pur, il faudrait juste 100 divisions de la liqueur salée pour le précipiter ; s'il ne faut que 80 divisions, c'est que l'objet ne renferme que 80 0/0 d'argent pur.

Telle est, sans détails, la méthode inventée par Gay-Lussac et encore usitée à la Monnaie de Paris.

Photographie. — Les sels d'argent se décomposent par la lumière ; une plaque préparée, recouverte d'un sel d'argent, est placée dans la chambre noire,

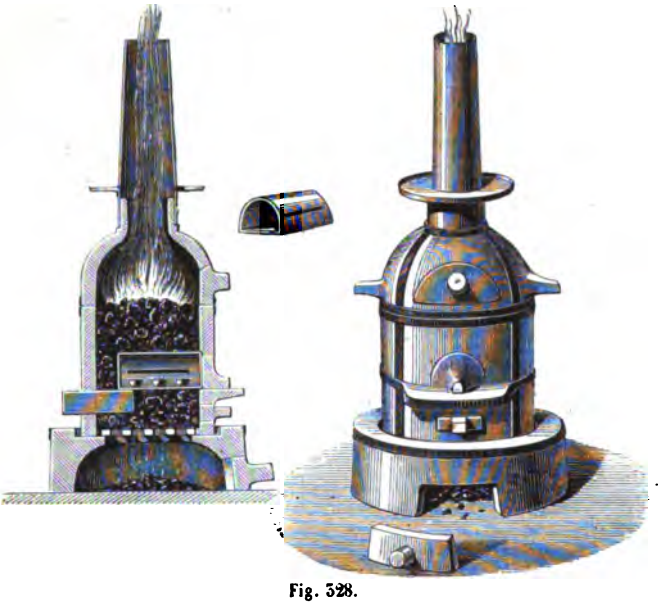


Fig. 328.

puis on fait tomber sur elle l'image d'un objet extérieur. Les points lumineux altèrent l'endroit sur lequel ils tombent, et y dessinent leur image par une teinte noire d'argent pulvérulent. L'image est donc formée, mais elle disparaîtrait à la lumière, si on n'avait soin de plonger d'abord la plaque dans un bain qui dissout tout le sel d'argent non décomposé.

Tel est en quelques mots le principe de la photographie, qui a pris depuis quelques années tant d'extension. Les sels d'argent ne sont pas les seuls corps, chez qui l'impression lumineuse se transforme en travail mécanique.

Métallurgie de l'argent. — L'argent natif se rencontre quelquefois. Nous avons vu qu'on le trouvait à l'état de sulfure, mêlé au plomb ou au cuivre et qu'on l'extrayait par coupellation.

Le plus souvent on trouve l'argent à l'état de sulfure mélangé à des sulfures de fer, de cuivre, de plomb, d'antimoine et enveloppé d'une gangue quartzeuse, et on le traite par chloruration.

On a pour but de transformer le sulfure d'argent en chlorure, et cela se fait au moyen du sel marin ; le chlorure est ensuite décomposé, soit par le mercure (méthode américaine), qui forme un chlorure de mercure et un amalgame d'argent d'où on retire l'argent par distillation, soit par le fer qui s'empare du chlore et précipite l'argent (méthode saxonne).

En 1861, la production de l'argent a été de près de 270,000 kilogrammes (prix 220 francs le kilogramme).

Or. — L'or est trop mou pour être employé seul, aussi est-il toujours allié à l'argent ou au cuivre. Doué d'une belle couleur, il est rare et presque inaltérable, d'où la grande valeur de ce roi des métaux.

Pour l'avoir pur, on dissout de la monnaie dans l'eau régale ; on précipite l'ar-

gent par l'acide chlorhydrique, on filtre et on verse dans la liqueur du sulfate de protoxyde de fer, qui réduit le sel d'or et précipite ce dernier sous la forme d'une poudre brune que l'on lave et que l'on fond.

C'est un métal jaune, le plus malléable et le plus ductile ; on le réduit en feuilles de $\frac{1}{1000}$ de millimètres d'épaisseur et, dans cet état, il est translucide et laisse passer une lumière verte, complémentaire du jaune d'or. Densité 19,5, fond à 1100°. N'émet pas de vapeurs sensibles.

L'or est insensible à l'oxygène, à l'acide sulfhydrique, aux acides chlorhydrique, azotique, sulfurique ; l'eau régale, mélange d'acides azotique et sulfurique, est seule à le dissoudre. Il est inattaquable aux alcalis.

Il y a un oxydule (Au^2O) et un sesquioxyde d'or ou acide aurique (Au^2O^3) qu'on obtient en les précipitant de leurs sels.

Pourpre de Cassius. — Dans une eau régale concentrée et tenant de l'or en dissolution, on plonge des lames d'étain, il se forme un précipité d'un beau pourpre découvert au dix-septième siècle par Cassius et fort usité dans la peinture sur porcelaine et dans la coloration des verres.

Sesquichlorure d'or (Au^2Cl^3). — Quand on évapore la dissolution d'or dans l'eau régale, on obtient de longues aiguilles jaunes de sesquichlorure, qui se dissout très-bien dans l'éther. Cette dissolution, dite or potable, sert à dorer les objets d'acier qu'il suffit d'y plonger un instant pour les recouvrir d'une mince lame d'or. Le cyanure d'or est aussi employé dans la dorure.

Alliages d'or. — Le seul alliage usuel est celui que forme l'or avec l'argent et le cuivre ; il est plus fusible et moins mou que l'or. Voici les titres des objets d'or : monnaie : $\frac{900}{1000}$, médailles : $\frac{916}{1000}$, bijoux : $\frac{750}{1000}$, $\frac{840}{1000}$ ou $\frac{920}{1000}$, avec une tolérance de $\frac{2}{1000}$ pour la monnaie et les médailles et $\frac{3}{1000}$ pour les bijoux.

Essais.— 1° Par la pierre de touche, pierre quartzeuse que l'on raye avec l'objet en or ; suivant la couleur de la raie et la manière dont elle se comporte avec l'eau régale, un observateur expérimenté peut juger du titre ;

2° Par la coupellation, en ajoutant quelques grammes d'argent, outre le plomb ; la litharge entraîne dans la coupelle les métaux étrangers, et il reste un bouton renfermant l'or et l'argent ; on enlève l'argent au moyen de l'acide azotique et l'or pur reste seul.

Caractères des sels d'or. — La potasse y donne un précipité rougeâtre. L'ammoniaque précipite une poudre jaune brun de fulminate d'or. L'acide sulfhydrique et les sulfhydrates donnent un précipité noir de sulfure d'or soluble dans les sulfhydrates. Les sels d'or sont facilement réduits par les acides sulfureux, arsénieux, par le sulfate de fer, etc.

Métallurgie de l'or. — On le trouve généralement à l'état natif dans des sables d'alluvion sous la forme de paillettes ou quelquefois de pépites ; on a trouvé des pépites pesant jusqu'à 50 kilogrammes.

C'est par des lavages successifs qu'on extrait l'or des sables ; les orpailleurs du Rhin prenaient l'eau avec une sébile et la jetaient sur une table inclinée garnie de drap : les grains d'or restaient dans le drap que l'on brossait ensuite. En Australie, en Californie, on broie les roches aurifères, et on les lave en les agitant ; l'or tombe au fond des auges ; il est impur, on le traite par le mercure qui le dissout, on filtre l'amalgame dans une peau de chamois, puis on le distille. La production moyenne annuelle de l'or peut s'évaluer à 280,000 kilogrammes valant 3,270 francs le kilogramme.

Platine. — Le platine (*platina* petit argent) est d'un gris intermédiaire entre l'acier et l'argent. Le platine du commerce se dissout dans l'eau régale, et on le

précipite par le chlorhydrate d'ammoniaque à l'état de chlorure double de platine et d'ammoniaque ($PtCl^2 + AzH^3,HCl$), qui, calciné, donne une masse spongieuse de platine, qu'on appelle mousse de platine. La mousse de platine se comprime dans un mortier d'acier à grands coups de marteau, et on arrive à le réduire en lames minces.

Le platine ne fond qu'à la température du chalumeau à oxygène et hydrogène ; au blanc, on le forge comme le fer et il se soude sur lui-même.

Le platine est très-malléable, très-tenace, altérable seulement par l'eau régale ; sa densité est voisine de 22. Les alcalis en présence de l'air peuvent cependant l'attaquer, mais les carbonates alcalins ne l'attaquent pas.

Quand on décompose du bichlorure de platine par un mélange de carbonate de soude et de sucre (lequel est chargé de fournir du charbon), on obtient une poudre noire appelée noir de platine, qui absorbe de grandes proportions de gaz, et facilite les combinaisons chimiques. L'alcool projeté sur du noir de fumée s'enflamme. La mousse de platine elle-même possède cette propriété.

NOTIONS SUR LA FABRICATION DES FERS, FONTES ET ACIERS

Les minerais sont toujours plus ou moins enveloppés d'une gangue, dont il faut autant que possible les débarrasser pour les traiter avec facilité et économie. On emploie pour cela une série de procédés mécaniques que nous ne pouvons décrire ici. Le minerai passe d'abord entre deux rouleaux cannelés en fonte, ou rouleaux broyeurs que l'on peut approcher plus ou moins l'un de l'autre ; l'un d'eux est maintenu par un levier, qui, si la résistance du minerai est trop grande, sera mis en mouvement et éloignera le rouleau plutôt que de le laisser briser.

Fig. 329.

Les morceaux obtenus sont passés au bocard, c'est tout simplement un mortier dont le fond est une pièce de bois, et sur lequel vient frapper un pilon à tête de fer mis en mouvement par un arbre à cames.

Le minerai étant pulvérisé, c'est au moyen d'une série de lavages, en l'agitant soit avec de petites roues ou patouillets, soit avec des tables animées d'un mouvement de va-et-vient, que l'on arrive à le séparer des matières étrangères ; le minerai, plus lourd que la gangue est retenu, tandis que celle-ci est entraînée par les eaux.

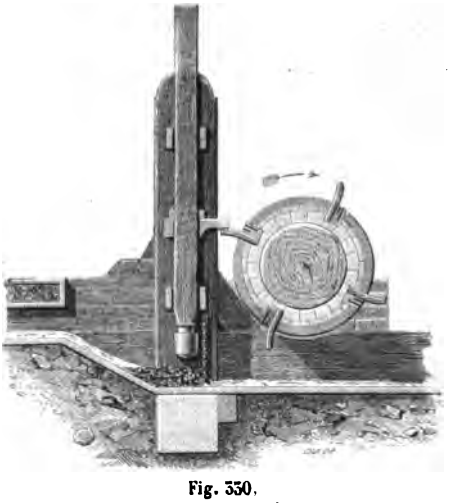


Fig. 330.

Minerais de fer. — Les minerais de fer sont nombreux. Jusqu'à présent on n'a guère exploité que les suivants : 1° fer natif ou météorique ; 2° peroxyde anhydre et hydraté, et oxyde magnétique ; 3° carbonates et oxalates. On rencontre en outre de grandes masses de minerais sulfurés, phosphorés, arséniés ; mais on ne les employait pas parce qu'on n'en tirait que de mauvais fers ; dans ces derniers temps on a tenté de les affiner (procédé Heaton).

Ce qui va suivre ne se rapporte qu'aux minerais oxygénés ou carbonatés (hématite rouge ou brune, peroxyde argileux anhydre ou hydraté, oxyde salin ou magnétique de Suède, fer carbonaté ou spathique).

Théorie de la métallurgie du fer. — Le minerai est un mélange d'oxyde et de carbonate de fer avec de l'argile et du calcaire. L'argile est un silicate d'alumine, renfermant un peu de fer, et plus ou moins de calcaire suivant qu'elle est plus ou moins marneuse. Ce mélange de matières étrangères est susceptible de fondre à une température à laquelle le fer se ramollit ; on pourrait donc, en martelant la boule ou la loupe du minerai à cette température, exprimer à peu près toute la gangue à l'état liquide, et il resterait un morceau de fer. Généralement, l'argile est trop pure pour fondre, c'est une matière infusible avec laquelle on construit la sole des fours, mais si elle est en présence de la chaux, il se forme un silicate double d'alumine et de chaux, plus fusible que le fer et qui s'écoule pour former les scories.

En général, il faut donc, avant le traitement, ajouter de la chaux au minerai. (La potasse ou la soude donneraient encore un mélange plus fusible, mais ces alcalis sont trop coûteux.)

Lorsque le minerai est très-riche et n'a que peu de gangue, il est inutile d'ajouter de la chaux, il se forme un silicate double d'alumine et de fer qui est fusible, et l'on perd ainsi un peu de métal. Ce procédé est inapplicable au minerai ordinaire, car le fer ne suffirait pas le plus souvent à saturer la silice.

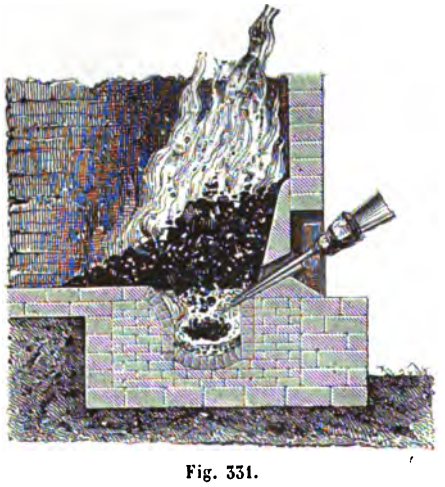


Fig. 331.

Forge catalane. — On construit un foyer en briques réfractaires que l'on remplit de charbon de bois, au-dessus duquel on place le minerai. On allume le combustible, et la combustion est activée par le vent d'une tuyère, dont le courant est dirigé vers le centre du foyer.

Le charbon donne de l'acide carbonique, qui, en montant rencontre du charbon porté au rouge, est réduit à l'état d'oxyde de carbone. L'oxyde de carbone est un agent réducteur, qui décompose l'oxyde du minerai, et l'excès de ce gaz vient brûler à la surface. Il se forme un silicate de fer fusible qui s'écoule en partie par un trou inférieur, et qui reste en partie emprisonné dans la loupe pâteuse que forme le métal. On porte cette loupe sous un lourd marteau, mû par des machines, et à chaque coup les scories suintent à la surface et s'écoulent : la loupe reste très-longtemps malléable et finalement on obtient du fer pur.

Ce procédé exige une grande consommation de combustible ; on l'emploie

surtout au pied des Pyrénées, où l'on trouve un minerai très-riche et beaucoup de bois; il donne d'excellent fer, mais tend à disparaître.

Méthode du haut fourneau. — Tous les minerais ne sont pas riches comme ceux des Pyrénées; il faut donc les débarrasser de leur gangue, en leur donnant de la fusibilité non par le fer mais par la chaux. Donc, on ajoute au minerai une proportion convenable de carbonate de chaux (castine) s'il est à gangue argileuse, ou une proportion d'argile (erbue) s'il est à gangue calcaire.

Le haut fourneau remonte à peu près au seizième siècle; on l'alimentait alors

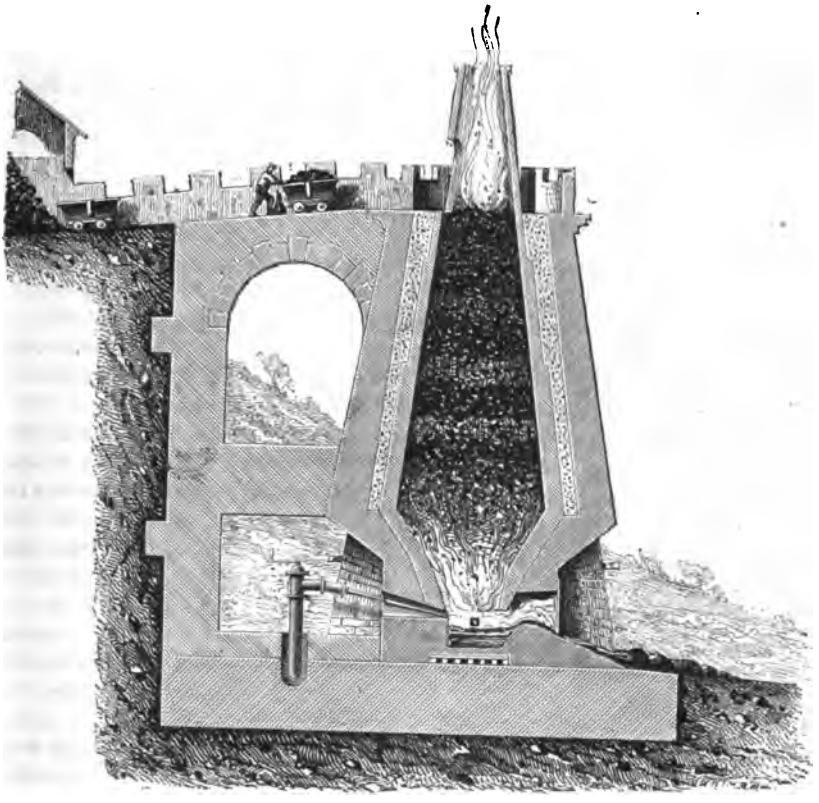


Fig. 332.

au charbon de bois. Au commencement du dix-septième siècle, on eut l'idée de recourir au coke.

Le haut fourneau est toujours adossé à une colline, sur le flanc de laquelle se font les approvisionnements de minerai et de combustible. De petits chariots à rails permettent de les amener à la partie haute du four dans le gueulard. Le four se compose d'un cône supérieur (la cuve) qui s'accole par sa base à un autre cône renversé (les étalages) ; la base commune est le grand ventre.

Au-dessous du dernier cône est une partie cylindrique où débouchent les tuyères, on l'appelle l'ouvrage ; elle est terminée par le creuset, et le creuset est ouvert sur une face par où se fait la coulée.

Un haut fourneau marche sans cesse, et il y a toujours une colonne descendante formée de couches alternatives de minerai et de combustible, et une co-

lonne ascendante gazeuse, produit de la combustion et des réactions chimiques.

Au moyen de tubes de fer et de tubes de porcelaine réfractaire, Ebelmen a pu recueillir et analyser la masse gazeuse à diverses hauteurs, et voici la composition moyenne trouvée par lui :

	VOISINAGE DE LA TUYÈRE	A 0^m,67 AU-DESSUS DE LA TUYÈRE	AU VENTRE	A LA MOITIÉ DE LA CUVE	AU GUEULARD
Acide carbonique.	8.11	0.16	0.17	0.68	7.15
Oxyde de carbone.	16.53	36.15	34.01	35.12	28.37
Hydrogène.	0.26	0.99	1.35	1.48	2.01
Azote.	75.10	62.70	64.47	62.72	62.47
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

L'air arrive par la tuyère, rencontre le charbon, et le brûle en donnant, outre l'oxyde de carbone, de l'acide carbonique ; celui-ci monte et rencontre un excès de charbon porté au rouge, il se trouve ramené à l'état d'oxyde de carbone, et il y a par le fait de cette décomposition une grande absorption de chaleur. Mais l'oxyde de carbone rencontre l'oxyde du minerai à une haute température ; cet oxyde est décomposé, et l'acide carbonique reformé près du gueulard, comme le montre le tableau ci-dessus. Le fer produit se combine au carbone en présence et même au silicium de la gangue, pour former de la fonte ; la fusion du métal et de la gangue s'achève près des tuyères où la température est très-élevée. La fonte gagne le fond du creuset, et la scorie de silicate fusible ou laitier surnage et finit par se déverser au-dessus de la grosse pierre ou dame qui limite le creuset. Quand le creuset est plein de fonte, on démasque une ouverture ménagée dans la dame et le métal s'écoule dans des rigoles de sable où il se prend en gueuses demi-cylindriques ; quelquefois, on fond immédiatement de grosses pièces demandant peu de soins. Pendant la coulée, on arrête le jet des tuyères ; puis on recommence, et le fourneau marche ainsi plusieurs années jusqu'à ce qu'il ait besoin d'être refait.

La présence de l'oxyde de carbone près des tuyères indique qu'il s'est formé plus haut du silicate de fer, que le charbon réduit directement à une très-haute température.

Il y a, avons-nous dit, une énorme absorption de chaleur par le fait de la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone ; les minerais sont souvent humides, et la chaleur leur enlève de la vapeur d'eau, d'où la source d'une nouvelle perte de chaleur.

Il sort sans cesse du haut fourneau une flamme bleuâtre produite par la combustion de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène ; on a cherché à recueillir ces gaz et à les utiliser pour faire marcher par exemple les machines soufflantes.

Un haut fourneau alimenté au charbon de bois a 10^m de hauteur environ ; lorsqu'on se sert de coke, le fourneau atteint jusqu'à 18^m de hauteur.

De la fonte. — On en distingue deux grandes classes : 1° la fonte grise, qui va du noir au gris clair ; 2° la fonte blanche. Entre les deux on place quelquefois la fonte truitée, qui est un mélange des précédentes.

La fonte grise est douce et se laisse limer et marteler sans se rompre. La fonte

blanche, a un éclat argentin, elle est dure, ne se laisse pas limer et se brise au moindre choc. Donc, il ne faut pas l'employer pour tout objet exposé à des chocs.

Les objets de fonte s'obtiennent par le moulage dans des moules de sable.

La fonte de première fusion est celle qui sort du haut fourneau ; nous avons dit plus haut qu'elle servait à faire les grosses pièces ; les petits objets, qui demandent à être plus soignés, sont fabriqués avec de la fonte de seconde fusion ; on l'obtient en chauffant la fonte dans des creusets à cuve appelés cubilots.

Certains objets ont besoin d'être très-durs à la surface ; on les obtient en les fondant en coquille, c'est-à-dire dans un moule métallique ; la surface se refroidit instantanément, elle subit la trempe et, par suite, prend une grande dureté.

A quoi tient la différence qui existe entre la fonte blanche et la fonte grise ? Lorsqu'on regarde à la loupe une fonte grise, on voit qu'elle renferme dans sa masse une multitude de paillettes noires, c'est du charbon à l'état de graphite, qui était dissous par le fer à la faveur d'une haute température, et que ce metal a abandonné par refroidissement lent. Au contraire, la fonte blanche a un grain uniforme, elle a été refroidie brusquement, et le fer a retenu en dissolution tout le charbon qu'il avait absorbé à une haute température.

Ce qui prouve bien que cette explication est vraie, c'est que dans une coulée qui donne de la fonte grise, si l'on jette de l'eau sur certaines gueuses, celles-ci seront formées de fonte blanche.

Suivant la marche de l'opération du haut fourneau, suivant les proportions de minerai et de combustible, le métal peut se refroidir lentement ou rapidement et donner de la fonte grise ou de la fonte blanche.

Les fontes riches en manganèse en soufre ou en phosphore, restent presque toujours à l'état de fontes blanches.

Lorsqu'un minerai donne un laitier très-fusible, le métal ne séjourne que peu de temps devant les tuyères et l'on a nécessairement une fonte blanche.

Il est rare que la fonte ne renferme pas du silicium, dû à la décomposition de la gangue ou de l'erbue par le charbon ; le silicium en petite quantité ne nuit pas, il n'a que l'inconvénient de donner moins de fer, parce que, lors de l'affinage de la fonte, il se forme un silicate de fer.

Le soufre et le phosphore rendent la fonte plus fusible ; le phosphore retarde le refroidissement, le soufre l'accélère et donne toujours une fonte blanche ; ces deux métalloïdes rendent la fonte cassante et peu tenace.

Le cuivre rend la fonte plus dure, mais il est nuisible dans la fabrication du fer.

Ainsi, la meilleure fonte pour le moulage des plaques tournantes, coussinets, engrenages, etc..., est la fonte grise qui ne renferme que peu ou point de matière, autres que le carbone et le fer.

Il faut distinguer les fontes au charbon de bois, qui sont toujours pures, si le minerai est pur, des fontes au coke qui sont souvent impures, même avec un minerai pur, parce que le coke renferme des pyrites et des terres.

Fabrication du fer doux par affinage de la fonte. — Affinage au petit foyer. — On remplit de charbon de bois un foyer analogue à celui de la forge catalane, dans le centre duquel on pousse peu à peu, au moyen de rouleaux, une gueuse de fonte. La fonte est plus fusible que le fer, elle se résoud en gouttes qui, sous le vent de la tuyère, sont soumises à une influence très-oxydante. Leur charbon est brûlé, changé en acide carbonique, puis en oxyde de carbone ; le silicium forme un silicate fusible de fer ($3FeO, SiO^3$). Le métal pur tombe au fond du creuset, où il forme une loupe pâteuse parce que le fer est moins fusible

que la fonte. A la fin de l'opération, les ouvriers soulèvent la loupe pour l'exposer à la tuyère et la ramollir convenablement, c'est ce qu'ils appellent avaler la loupe. Puis on la porte sous un marteau, mû par des machines, et par le martelage on exprime toutes les scories.

On obtient de la sorte d'exellent fer doux, mais le procédé est coûteux et l'on a un déchet de 25 pour 100.

Affinage par le procédé anglais ou à la houille. — Il comprend deux opérations : 1° le finage ou mazéage ; 2° le puddlage.

1° Le mazéage a pour but surtout d'enlever le silicium de la fonte. On fait tomber cette fonte en gouttelettes dans le courant d'air de la tuyère, dans un fourneau chauffé au coke. Il se forme des silicates plus fusibles et plus légers qui, dans le creuset, nagent sur le métal ; on fait sortir celui-ci par un trou de coulée, et on le refroidit à l'eau froide ; on obtient ainsi des plaques de fonte blanche très-cassante, appelée par les Anglais *fine metal*.

2° *Puddlage.* — Sur la sole réfractaire d'un four à réverbère, on dispose le métal. Sous l'action de la chaleur il fond, et, comme on a soin d'établir dans le four un tirage énergique, l'atmosphère est très-oxydante. Le carbone est brûlé, soit directement par l'air, soit par l'oxygène de l'oxyde de fer, car on a soin d'ajouter toujours des scories de silicate de fer basique ; il y un excès de base, cet excès est réduit et donne du fer. L'ouvrier, avec un ringard, retourne la masse en tous sens, l'oxyde de carbone se dégage en bouillonnant ; et l'on retire le fer doux par loupes de 25 à 30 kilogrammes que l'on porte sous le marteau.

Nous aurons lieu de revenir sur les qualités des fers dans une autre partie de l'ouvrage.

De l'acier. — L'acier est un composé intermédiaire entre le fer ordinaire et la fonte, il contient du carbone en dissolution et il en contient plus que le fer et moins que la fonte. Il en résulte deux modes de fabrication :

1° Enlever à la fonte une partie de son carbone, et l'on a l'acier naturel ;

2° Donner au fer doux une proportion convenable de carbone et l'on obtient l'acier de cémentation.

1° L'acier naturel se prépare au petit foyer, comme le fer doux, seulement on ne pousse pas l'opération jusqu'au bout, et c'est à l'habitude, à l'expérience de l'ouvrier que l'on s'en rapporte pour choisir le moment convenable afin d'obtenir une loupe d'acier. On étire immédiatement cette loupe, et l'on trempe un bout de la barre qu'elle a fournie. Si cette barre est de l'acier, le bout trempé devient cassant et se brise sous le marteau ; si, au contraire, la barre ploie sous le coup, c'est du fer.

De même, dans les fours à puddlage, on peut fabriquer de l'acier puddlé ; il suffit que l'ouvrier exercé dirige convenablement le courant d'air, afin d'arrêter la décarburation au moment opportun.

2° *Acier de cémentation.* — Dans de grandes caisses recouvertes d'un dôme et entourées de toutes parts par la flamme d'un foyer, on dispose des couches alternatives de fer en barre et de charbon (mélangé quelquefois de cendre et de sel marin). La surface des barres absorbe le charbon et les couches intérieures réagissent sur la surface pour lui enlever ce charbon ; au bout d'une quinzaine, on obtient des barres aciérées de constitution non homogène, puisque la surface est très-carburée, tandis que les parties centrales ne le sont pas.

Cet acier présente toujours à la surface de nombreuses ampoules qui semblent dues au dégagement d'un gaz ; aussi, l'appelle-t-on acier poule. Le capitaine Caron a montré qu'il se formait un peu de silicate de fer dans le métal, et, qu'à

la longue (la cémentation dure une quinzaine de jours), ce silicate se trouvait décomposé par le carbone de l'acier ; il se dégageait de l'oxyde de carbone produisant les ampoules observées. On éviterait cet inconvénient en cherchant à substituer des matières réfractaires calcaires aux matières siliceuses employées.

L'acier, obtenu par cémentation, est mauvais, et, pour l'employer, il faut le corroyer, c'est-à-dire souder et marteler ensemble à plusieurs reprises un certain nombre de barres de cet acier.

Mieux vaut encore fondre plusieurs barres dans des creusets réfractaires portés à une haute température. On obtient ainsi de l'acier fondu, bien homogène, qu'il est possible d'employer aux ouvrages délicats de coutellerie.

Les aciers de Damas sont obtenus en calcinant le fer avec certaines plantes qui lui cèdent leur carbone. Les aciers sont toujours préparés au moyen de lames minces, c'est probablement là ce qui explique leur supériorité. Le damassé de la surface s'obtient en traitant ces lames par l'acide sulfurique ou azotique, qui enlève la surface, et met à nu la composition intérieure formée de fer mélangé à de l'acier ; l'acier, grâce à son charbon, conserve une teinte noire qui ressort à côté de la teinte brillante du fer.

Les aciers préparés par les méthodes précédentes ne sont bons qu'autant qu'ils sont fabriqués avec des fers purs. Nous parlerons plus loin des nouveaux procédés qui permettent d'obtenir un acier convenable avec un fer quelconque.

De la trempe. — La trempe consiste à refroidir brusquement, par immersion dans une substance à la température ordinaire, un corps qui se trouve à une température élevée. Cette modification brusque détermine souvent un changement moléculaire et par suite un changement des propriétés physiques. Nous avons vu que par la trempe du soufre on obtenait un corps mou et pâteux, que par la trempe du verre on obtenait les larmes bataviques que pulvérise la moindre secousse.

La trempe ne produit rien sur le fer ; mais l'acier porté au rouge et plongé dans l'eau froide devient extraordinairement cassant.

Il résulte d'expériences et de considérations qui ne peuvent trouver place ici, que le carbone est dissous dans le fer à l'état liquide ; si l'on produit un refroidissement brusque, les molécules de carbone tendent à prendre l'état cristallin, c'est-à-dire à se transformer en diamant ; donc le métal acquiert une partie de la dureté du diamant, et l'effet est d'autant plus fort que le métal renferme plus de carbone et que la trempe est plus énergique.

Par un refroidissement lent, le carbone prend l'état amorphe, ne cristallise point, et le fer conserve toutes ses propriétés.

Si l'on vient à chauffer l'acier trempé, à le recuire, comme on dit, le carbone diamant repasse à l'état liquide en proportion d'autant plus grande que la température du recuit est plus élevée, et l'acier reprend dans la même proportion les qualités du fer.

En faisant varier la température du recuit, on pourra donc obtenir un métal ayant des propriétés intermédiaires entre celles du fer et de l'acier, et cela au degré que l'on voudra.

La température du recuit ne se mesure pas au thermomètre mais à la couleur que prend la lame d'acier, cette coloration est due à l'oxydation de la surface. A 200°, la surface est jaune clair (couteaux) ; à 255°, brune ; à 295°, bleuâtre ; à 300°, indigo (ressorts de montre).

C'est la trempe qui explique les différences que nous avons signalées au début entre la fonte grise et la fonte blanche.

De la constitution des fers, fontes et aciers. — On s'est beaucoup occupé depuis quelques années de la constitution des fers et des aciers, et l'on est arrivé à des procédés de fabrication qui ont donné des résultats inespérés.

Dans l'industrie, on ne trouve pour ainsi dire pas de fers parfaitement purs, toutefois on donne le nom de fer doux au métal plus ou moins pur obtenu par l'affinage de la fonte, et non susceptible de recevoir la trempe. La fonte est le produit brut impur qui résulte de la réduction du minerai ; la fonte se trempe par un refroidissement brusque. L'acier comprend une série de produits intermédiaires entre le fer doux et la fonte ; c'est ainsi qu'il faut le concevoir.

Ainsi, l'acier commence au fer doux et finit à la fonte, mais les limites ne sont pas tranchées, et il faut regarder la série fer doux, acier, fonte, comme continue : on passe de la fonte noire au fer doux en parcourant tous les degrés de l'aciération ; les propriétés se transforment insensiblement en même temps que la composition chimique.

Toutefois on retrouve les mêmes matières étrangères dans les trois termes, fer, fonte, acier d'une même série ; ce qui varie surtout, ce qui constitue la différence réelle au point de vue physique et chimique, c'est la proportion seule de carbone.

Il est vrai que l'esprit a peine à concevoir que des proportions minimes d'un seul corps, le carbone, puisse avoir autant d'influence sur les propriétés d'un métal ; mais cela n'a rien d'étonnant si l'on se rappelle que nous avons vu bon nombre de métaux modifiés profondément dans leur aspect, leur structure, leurs qualités par la présence de quantités minimes de matières étrangères.

M. Fremy, le savant chimiste, a signalé la présence de l'azote dans l'acier, et lui attribue une influence prépondérante ; il n'en est rien ; tous les métaux, à l'état liquide ou pâteux, absorbent de grandes quantités de gaz et l'analyse montre qu'il existe de l'azote aussi bien dans le fer doux que dans l'acier.

Nous avons dit que les fontes, fers et aciers renfermaient toujours beaucoup de matières étrangères, et cela se comprend, quand on réfléchit qu'aux substances du minerai viennent s'ajouter celles des fourneaux et du combustible ; nous reproduirons ici l'analyse d'une bonne fonte de Suède, donnée par M. Grüner, inspecteur général des mines :

Fer	93,660	
Aluminium	0,178	
Manganèse	0,190	
Calcium et magnésium	traces	
Cuivre	0,005	
Silicium	0,941	
Phosphore	0,050	
Soufre	0,120	
Carbone	3,920	dont 2,17 de graphite non dissous.
Total	99,064	

Les fontes grises peuvent renfermer jusqu'à 10 p. 100 de matières étrangères, et les fontes blanches, provenant de fer spathique, et réputées excellentes peuvent encore avoir une composition très-complexe, ainsi que cela résulte de l'analyse ci-dessous faite sur une fonte de Styrie regardée comme très-pure :

Carbone combiné	3,79
Silicium	0,34
Soufre	0,02

Phosphore	0,07
Manganèse	1,06
Calcium	0,05
Magnésium	0,02
Fer	94,57
	99,92

Si l'acier est obtenu par voie d'affinage, les éléments très-oxydables, tels que le manganèse, le calcium, le magnésium s'en vont seuls ; l'aluminium, ainsi que des traces de soufre, de phosphore, de silicium restent toujours dans l'acier.

L'aciération dépend donc uniquement de la proportion de carbone, et l'on distingue en Suède, d'après la dureté mesurée à la suite de la trempe, neuf sortes d'acier Bessemer, qui sont, suivant M. Grüner :

N° 1	renfermant	2 % de carbone. . . .	Acier très-dur, voisin de la fonte blanche.
N° 1 ½	—	1,75 —	Se forge, mais ne se soude pas.
N° 2	—	1,50 —	Se forge bien, mais ne se soude pas.
N° 2 ½	—	1,25 —	Se forge bien et se soude difficilement.
N° 3	—	1,00 —	Acier dur, se forge bien et se soude.
N° 3 ½	—	0,75 —	Acier ordinaire, se forge et se soude bien.
N° 4	—	0,50 —	Acier doux, se forge et se soude très-bien.
N° 4 ½	—	0,25 —	Fer dur ou fer à grains, se trempe très-peu.
N° 5	—	0,05 —	Fer doux ou fer homogène, ne se trempe pas.

Au delà du n° 9, on trouverait ce qu'on appelle le fer brûlé, il ne renferme plus de carbone, mais un peu d'oxygène.

Toutes choses égales d'ailleurs, c'est de la teneur en carbone que dépendent surtout les qualités de l'acier.

Nouveaux procédés de fabrication de l'acier. — Nous avons étudié la fabrication de l'acier, au moyen de deux procédés : 1° affinage direct de la fonte, 2° récarburation du fer doux ou cémentation, et nous avons vu que par ces procédés on arrivait difficilement à obtenir un bon acier homogène, à moins de le corroyer et de le fondre à nouveau.

La cause de cette aciération non homogène tient à ce que l'on opère sur de la fonte qui reste sinon à l'état solide, du moins à l'état pâteux, de sorte que les réactions ne se passent point dans toute la masse.

Le grand avantage des procédés nouveaux, c'est d'opérer sur de la fonte portée à une assez haute température pour qu'elle reste fluide ainsi que le produit obtenu.

Acier Bessemer. — La découverte due à M. Bessemer consiste à faire passer de l'air dans un creuset renfermant de la fonte liquide ; toutes les substances étrangères sont oxydées, et disparaissent successivement suivant l'affinité qu'ils possèdent pour l'oxygène et pour le fer.

Ainsi l'oxydation pénètre dans toute la masse, tandis que dans le mazéage et le puddlage, le métal reste à l'état pâteux, et, fût-il liquide, le vent des tuyères ne frappe que la surface.

Lorsque la fonte traitée par le procédé Bessemer est pure, il suffit d'arrêter l'oxydation au moment où tous les corps étrangers ont disparu sauf la proportion convenable de carbone, et l'on obtient directement l'acier fondu.

Le plus souvent, la fonte est trop impure pour que l'on puisse procéder ainsi ; on prolonge le courant d'air de manière à enlever toutes les matières étrangères et à obtenir non pas même du fer doux, mais du fer brûlé. Dans ce fer brûlé, on ajoute une proportion calculée d'avance de fonte aciéreuse ; le tout fond ensemble et l'on obtient tel acier que l'on veut.

Une circonstance à remarquer et qui facilite singulièrement la réaction, c'est que le courant d'air qui traverse la fonte, au lieu de la refroidir, l'échauffe par suite de la chaleur que dégagent les combinaisons chimiques.

L'appareil dont on se sert est un grand cubilot mobile autour d'un axe horizontal ; l'air est envoyé par le fond, et l'opération terminée, un système d'engrenages permet d'incliner le cubilot et de verser le métal en fusion soit dans des moules, soit dans des poches en fer avec lesquelles on le transporte. On peut opérer en une fois sur plusieurs tonnes de fonte ; on voit que nous sommes loin de la fabrication de l'acier en barreaux de faible volume.

Il est à remarquer que les fontes riches en manganèse ne réussissent pas dans l'appareil Bessemer ; la masse reste pâteuse et il se produit des explosions. La fonte ne doit pas renfermer plus de 2 pour 100 de manganèse.

On a longtemps employé dans les appareils Bessemer de la fonte refondue au four à réverbère ; l'usine de Terre-Noire n'a pas craint de prendre de la fonte de première fusion, et c'est grâce à cette économie qu'elle a pu passer avec la Compagnie P. L. M. un marché de 22,000 tonnes de rails en Bessemer à 315 francs la tonne.

L'acier Bessemer est comme un nouveau métal, d'une dureté exceptionnelle et d'un bon marché relatif ; il rend et rendra à l'industrie de précieux services.

Toutefois, on n'arrive pas par ce procédé à épurer la fonte autant qu'on le croyait d'abord ; le soufre et le phosphore ne sont pas éliminés, et les minerais qui en renferment donnent toujours un mauvais métal, court et rouverin.

On ne peut donc pas utiliser la masse énorme que l'on possède de minerais sulfurés et phosphorés.

Procédé Heaton. — Récemment, M. Heaton vient imaginer un procédé qui permettra probablement de retirer d'excellent acier des minerais les plus impurs. A la rigueur, on peut se débarrasser du soufre par un grillage fait avec soin, mais le phosphore reste toujours. M. Heaton s'en débarrasse en injectant dans la masse de la fonte en fusion de nombreux jets d'azotate de soude, qui changent le phosphore en phosphate de soude liquide qu'on recueille à la surface. Espérons que l'avenir nous apprendra le succès de cette méthode, qui viendra augmenter nos richesses et nos forces industrielles.

COMBINAISONS DES MÉTAUX ENTRE EUX ET ALLIAGES UTILES A L'INDUSTRIE

Avant de traiter des alliages, nous allons donner ici quelques propriétés des métaux simples.

TABLEAU DES CHARGES SOUS LESQUELLES SE ROMPT UN FIL MÉTALLIQUE DE 0m,002 DE DIAMÈTRE.

Fer.	250kg.	Argent.	85kg.	Nickel.	48kg.
Cuivre.	137	Or.	68	Étain.	16
Platine.	125	Zinc.	50	Plomb.	12

TABLEAU DES MÉTAUX DISPOSÉS DANS L'ORDRE DE LEUR PLUS GRANDE FACILITÉ A PASSER.

1° Au laminoir.

1° Or.
2° Argent.
3° Cuivre.
4° Étain.
5° Platine.
6° Plomb.
7° Zinc.
8° Fer.
9° Nikel.

2° A la filière.

1° Or.
2° Argent.
3° Platine.
4° Fer.
5° Nickel.
6° Cuivre.
7° Zinc.
8° Étain.
9° Plomb.

TABLEAU DE LA CONDUCTIBILITÉ DES MÉTAUX POUR LA CHALEUR, C'EST-A-DIRE DE LA VITESSE AVEC LAQUELLE LA CHALEUR SE RÉPAND DANS LEUR MASSE.

Or.	1000	Cuivre.	898	Étain.	303
Platine.	981	Fer.	374	Plomb.	180
Argent.	973	Zinc.	363		

On voit que pour la vitesse d'échauffement, les vases de cuivre sont bien au-dessus des vases de fer.

POINTS DE FUSION DES MÉTAUX.

Mercure.	— 39°	Bismuth.	270°	Cuivre.	1090°
Potassium.	+ 58°	Plomb.	320°	Or.	1100°
Sodium.	96°	Zinc.	410°	Fonte.	1500°
Étain.	230°	Argent.	1000°	Fer doux.	1600°
				Platine.	2000°

TABLEAU DES CHALEURS SPÉCIFIQUES.

Fer.	0,1138	Cuivre.	0,0952	Étain.	0,0508
Nickel.	0,1086	Argent.	0,0570	Platine.	0,0324
Zinc.	0,0955	Plomb.	0,0514	Or.	0,0324

On voit qu'un vase de cuivre demande moins de chaleur qu'un vase de fer pour s'échauffer d'autant; que des vases d'argent et d'or en demandent encore moins.

Alliages. — En unissant les métaux, on change leurs propriétés et on obtient de nouvelles substances très-propres à certains usages auxquels les métaux purs ne se prêteraient pas.

Caractères d'imprimerie. — Pour fabriquer les caractères d'imprimerie il faut une substance qui soit à la fois dure et non cassante. Le plomb seul est trop mou; l'antimoine est cassant. L'alliage formé de 80 de plomb et de 20 d'antimoine, est très-convenable pour cet usage.

Alliage de Réaumur. — Un mélange de 70 d'antimoine avec 30 de limaille de fer donne une alliage très-dur qui fait feu au briquet.

Alliage du plomb et de l'étain. — L'alliage de parties égales de plomb et d'étain, constitue la soudure des ferblantiers; l'alliage de 2 de plomb pour 1 d'étain, est la soudure des plombiers.

Un alliage est toujours plus fusible que le plus fusible des métaux qu'il renferme. Ainsi l'alliage d'étain Sn^5Pb fond à 194°, Sn^3Pb à 186°, SnPb à 241°.

L'alliage de Darcet est formé de 8 de bismuth, 5 de plomb et 3 d'étain; il fond au-dessous de 100°. On a voulu l'employer à faire des rondelles fusibles que l'on plaçait sur les chaudières à vapeur, et qui fondaient à la température correspondant à la pression marquée par le timbre de la chaudière; mais l'essai n'a pas réussi, parce que la plupart des alliages ne sont pas des combinaisons chimiques, mais un mélange de métaux et de composés définis. A la longue, la liquation se produit, c'est-à-dire que l'un des métaux ou l'un des alliages définis se sépare de la masse qui se trouve désagrégée. C'est ce qui arriva pour les rondelles fusibles, qui ne tardaient pas à se désagréger, même à une température inférieure à celle qu'elles ne devaient pas dépasser.

Alliage de cuivre et de zinc. — Le plus commun de ces alliages, le laiton commun renferme $\frac{2}{3}$ de cuivre et $\frac{1}{3}$ de zinc. Dans des creusets de terre, on place

le cuivre en grenaille et le zinc en fragments, et l'on place les creusets dans un four; le mélange fond et on le coule dans des moules. Le laiton graisse la lime et est très-difficile à travailler, si on n'y ajoute pas un peu de plomb et d'étain.

Le similor, le tombac, le chrysocale sont des variétés de laiton, rappelant la couleur de l'or.

Alliages de cuivre et d'étain. — Très-difficiles à produire homogènes, parce que les deux métaux ont des densités et des points de fusion différents, et ils tendent toujours à se désunir.

Bronze des canons.	90	de cuivre et	10	d'étain.
Métal des cloches.	78	—	22	—
Métal des tam-tams et cymbales.	80	—	20	—
Miroirs de télescope.	67	—	33	—
Bronze des médailles.	95	—	5	—

Refroidis lentement, ces alliages sont cassants; c'est pour cela que, pendant longtemps, on ne pouvait fabriquer de tam-tams en France.

Darcet reconnut que la trempe les rendait malléables et élastiques.

La monnaie de billon renferme 95 de cuivre, 4 d'étain, 1 de zinc.

Amalgames. — Le mercure dissout presque tous les métaux, ainsi que nous l'avons vu. L'amalgame d'or est employé pour la dorure.

Il y a un amalgame de cuivre que les dentistes emploient pour plomber les dents. Chauffé un peu au-dessous de la température d'ébullition du mercure, et broyé dans un mortier, il devient pâteux et facile à pétrir. Au bout d'un certain temps il devient très-dur et prend une texture cristalline.

L'amalgame d'étain constitue le tain des glaces : sur une table de marbre on étend une feuille d'étain au moins aussi grande que la glace, on la recouvre de mercure, puis on fait glisser la glace qui chasse devant elle l'excès de mercure, et empêche l'air de rester emprisonné. On recouvre ensuite de gros blocs de pierre; au bout de quinze jours, l'excès de mercure a disparu, et le tain adhère à la glace.

Étamage. — L'étamage a pour but de recouvrir d'une couche d'étain peu oxydable la surface des métaux oxydables, cuivre, fer, etc.

Décapage. — Il faut d'abord décaper la pièce à étamer. On décape le cuivre en projetant sur la pièce chauffée du sel ammoniac ou chlorhydrate d'ammoniaque, qui fond et que l'on étend avec une étoupe : ce sel forme avec le vert-de-gris des sels volatils qui se dégagent. Le fer et la tôle se décapent à l'acide chlorhydrique.

Pour étamer une pièce de cuivre, on verse dedans de l'étain liquide que l'on promène ensuite; il adhère en couche mince, qu'il faut assez souvent renouveler.

La tôle, après des décapages répétés, est séchée et plongée dans un bain d'étain fondu, puis séchée de nouveau, non à l'air, mais dans la vapeur d'eau, afin d'éviter toute oxydation. Avant d'être plongées dans le bain d'étain, les feuilles sont plongées d'abord dans la graisse fondue. On obtient ainsi le fer-blanc.

Le fer galvanisé, ou fer recouvert de zinc se prépare d'une manière analogue. Ce métal est à l'abri de l'oxydation, parce que le fer est négatif par rapport au zinc; en présence de l'humidité, ils forment un élément de pile et l'oxygène tend à se porter sur le zinc; celui-ci s'oxyde donc, mais son oxyde est imperméable et adhérent, et une fois qu'il y en a une couche de formée sur le zinc, l'oxydation s'arrête.

Action de l'oxygène sur les métaux. — Dans la classification des métaux,

nous avons vu que tous les métaux se combinaient à l'oxygène en l'absorbant directement à une température plus ou moins élevée, à l'exception des métaux de la dernière section. Nous invitons le lecteur à se reporter à cette classification.

Nous avons vu que bon nombre de métaux brûlaient à l'air, et que les métaux réduits en poudre fine s'y enflammaient à la température ordinaire.

L'air sec agit comme l'oxygène, mais avec moins d'intensité à cause de la présence de l'azote.

L'air humide agit plus énergiquement que l'air sec à cause de l'eau et de l'acide carbonique qu'il renferme. Plusieurs métaux, entre autres le fer, qui ne s'oxydent pas dans l'air sec, sont altérés par l'air humide, il se forme généralement un hydro-carbonate de l'oxyde.

Les oxydes étaient connus des alchimistes, qui supposaient que les métaux étaient des oxydes auxquels était venu s'ajouter du phlogistique. Les oxydes métalliques sont généralement solides, cassants et pulvérulents sans saveur ni odeur; leur densité est supérieure à celle de l'eau et inférieure à celle de leur métal, sauf pour la potasse et la soude. Presque tous les oxydes, à l'exception de ceux de métaux de la première section, sont insolubles dans l'eau.

Nous avons reconnu cinq genres d'oxydes :

1° Les oxydes basiques, qui sont les plus stables et qui, par leur alliance aux acides, donnent la plupart des composés usuels;

2° Les oxydes indifférents jouant le rôle d'acides en présence de bases fortes et le rôle de bases en présence des acides énergiques;

3° Les oxydes acides, qui sont généralement des acides faibles et facilement décomposables;

4° Oxydes singuliers, qui ne se combinent pas, mais qui, en présence d'un acide, perdent leur oxygène et sont changés en oxydes basiques;

5° Oxydes salins (minium, oxyde magnétique), qui résultent de l'union de deux oxydes d'un même métal.

L'oxygène fait passer les oxydes à un degré d'oxydation supérieure. L'hydrogène et le carbone les réduisent : $Mo + H = Ho + M$, et $2Mo + C = Co^2 + 2M$.

Le soufre réduit les oxydes faibles et donne un sulfure avec de l'acide sulfureux; si l'oxyde est une base puissante, il se forme un sulfate.

Le chlore décompose, en général, les oxydes et donne de l'oxygène et un chlorure : si le chlore est humide, l'eau est décomposée aussi, il se forme un chlorure et un oxyde supérieur. Avec les alcalis, on obtient, outre le chlorure alcalin, un hypochlorite ou un chlorate.

Un métal décompose les oxydes des métaux, qui viennent après lui dans le tableau de classification, et prend la place de ces métaux.

Des sels. — Les anciens chimistes donnaient le nom de sels à quelques composés cristallisés dont le type était le sel marin.

Lavoisier appelait sel la combinaison d'un acide oxygéné avec une base oxygénée. Ce qu'on appelle aujourd'hui oxysels. Les sulfures, chlorures, etc., se trouvaient exclus de cette définition.

Berzelius, se fondant sur la décomposition qu'éprouvent les composés binaires par la pile, appelait sel une combinaison de deux corps, dont l'un joue le rôle d'élément électro-positif ou de base (se rend au pôle négatif de la pile) et l'autre le rôle d'élément électro-négatif ou d'acide (se rend au pôle positif).

Quoique plus large que celle de Lavoisier, cette théorie tend à disparaître aujourd'hui; les travaux des chimistes modernes, à la tête desquels il faut placer Gerhardt, conduisent à abandonner la théorie du dualisme, imaginée par

Lavoisier, et à réunir les composés chimiques en familles ayant même arrangement moléculaire, une ou plusieurs des molécules du type pouvant être remplacées par une ou plusieurs molécules similaires. C'est là, croyons-nous, le point de vue vraiment philosophique, sous lequel il faut envisager les composés chimiques.

Pour nous restreindre dans le cadre de cet ouvrage, nous nous en tiendrons à la théorie de Lavoisier qui permet de comprendre et d'expliquer suffisamment le mécanisme et la formation des sels usuels.

Les sels sont des corps solides, que l'on peut généralement obtenir à l'état cristallin. Ils sont incolores, si l'acide et la base sont incolores ; si l'un des composants est coloré, le sel affecte une couleur analogue ; si les deux composants sont colorés, la couleur des sels est une fusion des deux teintes.

Rapport de l'oxygène de l'acide à l'oxygène de la base. — *Première loi.* — Dans les sels formés par un même acide, il y a un rapport simple et constant entre le poids d'oxygène de la base et le poids d'oxygène de l'acide. C'est un résultat d'expérience, découvert par Berzelius.

Dans les carbonates,	l'acide	contient	deux fois	autant d'oxygène que la base :
Dans les sulfates,	—		trois fois	— —
Dans les azotates,	—		cinq fois	— —
Dans les chlorates,	—		cinq fois	— —
Dans les phosphates,	—		1 fois et $\frac{1}{2}$	— —

Deuxième loi. — Les diverses quantités de bases qui s'unissent à un même acide pour former une série de sels, sont entre elles dans les mêmes rapports que les quantités des mêmes bases, qui s'unissent à un autre acide pour former une autre série de sels.

Exemple : 500 grammes d'acide sulfurique s'unissent à 589^{gr},30 de potasse, 350^{gr} de chaux, 958^{gr} de baryte. Pour 500 grammes d'acide azotique, il faudra 436^{gr},51 de potasse, 259^{gr},63 de chaux, etc., et ces nombres sont entre eux comme les premiers.

Nous avons déjà vu cette loi dans la théorie des équivalents. On peut, par ce qui précède, résoudre tous les problèmes de chimie, dans le genre du suivant : combien entre-t-il de soude dans un poids donné de sulfate de soude, ou combien de sodium ? Combien faut-il d'acide sulfurique pour saturer un poids donné de soude ? Ces problèmes peuvent se varier indéfiniment, mais ils se ramènent toujours à la même question qui se résout par une proportion.

Solubilité des sels. — Il est très-peu de sels complétement insolubles, nous avons cité le sulfate de baryte et le chlorure d'argent. Le plus souvent, l'insolubilité n'est que relative ; ainsi le sulfate de chaux sera, pour ainsi dire, insoluble, si on le compare à l'azotate d'ammoniaque.

La solubilité d'un sel se mesure par la quantité que peut en dissoudre un poids donné d'eau à une température fixée. Elle est, en raison directe, de l'affinité du sel pour l'eau, et, en raison inverse, de sa cohésion.

A une température donnée, lorsque l'eau ne veut plus dissoudre de sel, on dit que la dissolution est saturée. La saturation est spéciale à la température considérée, et si cette température change, la dissolution peut, ou abandonner sous forme de précipité une partie du sel qu'elle renferme, ou dissoudre une nouvelle quantité du sel sur lequel elle repose.

La solubilité augmente, en général, avec la température, suivant une loi irrégulière : sur une ligne d'abscisses on porte les températures, et l'on prend

comme ordonnées les quantités dissoutes correspondantes, on obtient alors les courbes de solubilité des divers sels et ces courbes sont très-irrégulières.

Il est probable que tous les sels présentent un maximum de solubilité ; nous avons reconnu l'existence de ce maximum pour les sulfates de soude et de chaux.

Une dissolution saturée d'un sel est parfaitement apte à dissoudre un autre sel.

Les dissolutions salines ont toujours un point d'ébullition plus élevé que celui de leurs dissolvants.

Tous les sels alcalins (potasse, soude, ammoniaque) et tous les azotates sont solubles dans l'eau.

La plupart des sulfates et hyposulfates sont solubles, presque tous les sels renfermant un excès d'acide sont solubles.

Les carbonates, borates, phosphates (excepté les sels alcalins) et tous les sels à excès de base sont insolubles.

Hydratation. — Beaucoup de sels ont réellement une affinité chimique pour l'eau ; ils s'y dissolvent et se combinent avec elle en partie. Il faut donc bien distinguer l'eau de cristallisation de l'eau d'hydratation. Les vitriols nous ont donné des exemples de sels hydratés.

Sels neutres, acides et basiques. — A l'origine, nous avons appelé acide tout oxyde qui rougissait la teinture bleue de tournesol, et nous avons appelé base tout oxyde qui ramenait au bleu la teinture de tournesol rougie par un acide. D'après cela, un sel serait neutre, s'il ne produisait pas d'action sur la teinture de tournesol et les autres réactifs colorés (teinture de violette, teinture de curcuma); il serait acide, s'il rougissait le papier bleu de tournesol, et il serait basique, s'il ramenait au bleu le papier rouge de tournesol.

Cette classification est inadmissible, car il est des sels qu'il faut considérer comme neutres qui agissent sur les réactifs colorés, et d'autres qu'il faut considérer comme acides ou basiques qui n'agissent pas sur ces réactifs.

Comment s'explique cette coloration variable de la teinture de tournesol ?

La base de cette teinture est un lithmate de chaux ; l'acide lithmique est un acide végétal rouge, qui donne des sels bleus. L'acide lithmique est un acide faible ; en présence de l'acide sulfurique, il est déplacé, il se forme du sulfate de chaux, l'acide lithmique se trouve libre et manifeste sa couleur naturelle. Donc un corps qui rougit la teinture de tournesol est un corps capable d'enlever sa base à l'acide lithmique : c'est ce que les acides purs feront à un degré plus ou moins énergique, mais des sels dont l'acide est fort et la base faible produiront le même effet.

Le tournesol étant rougi par un acide, tout corps qui la ramène au bleu est un corps susceptible de se combiner à l'acide lithmique.

Un corps sans action sur le tournesol est tout simplement un corps incapable de décomposer le lithmate de chaux.

Il faut appeler sel neutre tout sel où la quantité d'oxygène de la base est à la quantité d'oxygène de l'acide dans le rapport simple qui constitue la loi de composition du genre auquel le sel appartient.

Ainsi les sulfates seront neutres si la base renferme le tiers de l'oxygène de l'acide ; le sulfate neutre de soude sera en même temps neutre aux réactifs colorés parce qu'il est formé d'un acide et d'une base énergiques ; le sulfate neutre de cuivre pourra fort bien être acide pour les réactifs colorés, parce que l'oxyde de cuivre est une base faible et l'acide sulfurique un acide puissant qui tendra à enlever la chaux à l'acide lithmique.

Un sel est basique si la base renferme plus d'oxygène qu'elle ne devrait en renfermer d'après la loi de constitution du genre.

Un sel est acide si la base renferme moins d'oxygène qu'elle ne devrait en renfermer d'après la loi de constitution du genre.

Fusion des sels. — Les sels anhydres commencent par fondre, puis ils se décomposent à une température plus ou moins élevée. Si l'un des éléments est volatil (acide carbonique, ammoniaque) la décomposition sera facile. Si les deux éléments sont volatils, le sel pourra distiller sans se décomposer, tels sont le carbonate et le chlorhydrate d'ammoniaque.

Un sel hydraté fond plus facilement, parce qu'il fond dans son eau d'hydratation (fusion aqueuse), mais cette eau d'hydratation s'évapore, le sel redevient solide pour fondre réellement puis se décomposer à une température plus élevée (fusion ignée).

Quand un sel hydraté renferme très-peu d'eau d'hydratation, ou bien quand un sel (le sel marin par exemple) renferme de l'eau interposée entre les lamelles de ses cristaux, il n'éprouve pas la fusion aqueuse, mais il décrépite, c'est-à-dire qu'il produit une série de petites explosions dues à de la vapeur d'eau accumulée dans de petits espaces fermés.

Lois de Berthollet. — Les réactions qui ont lieu au contact d'un sel avec un autre sel, avec un acide ou une base, sont résumées dans les lois de Berthollet.

Action des acides (1re *loi*). — Un acide décompose un sel lorsqu'il peut former avec la base un sel insoluble ou moins soluble que le sel donné. Exemple : l'acide sulfurique précipite l'azotate de baryte, et l'acide chlorhydrique précipite les sels d'argent.

2e *loi*. Un acide décompose un sel dont l'acide est plus volatil que lui. — Exemple : Les acides carbonique et sulfhydrique sont chassés par les autres ; à une haute température, les acides phosphorique et borique chassent l'acide sulfurique.

3e *loi*. Un acide décompose un sel dont l'acide est insoluble ou moins soluble que l'acide donné. — Exemple : les acides décomposent le borate de soude.

Action des bases. 1re *loi*. — Une base décompose un sel lorsqu'elle peut avec l'acide former un sel insoluble. La baryte, la chaux précipitent le sulfate de soude.

2e *loi*. — Une base fixe chasse de ses sels une base volatile. C'est ainsi que l'ammoniaque est chassée par la plupart des bases.

3e *loi*. — Une base soluble décompose un sel dont la base est insoluble ; celle-ci se précipite. En parlant des caractères des sels métalliques, nous avons eu plus d'une occasion de vérifier cette loi.

Action des sels les uns sur les autres. 1re *loi*. — Deux sels solubles se décomposent, lorsque, par échange réciproque de leurs acides et de leurs bases, ils peuvent former un sel insoluble. Exemple : sulfate de soude et azotate de baryte, sel marin et azotate d'argent.

2e *loi*. — Deux sels chauffés ensemble se décomposent lorsque, par échange réciproque de leurs acides et de leurs bases, ils peuvent donner naissance à un sel plus volatil que chacun d'eux.

3e *loi*. — Deux sels chauffés ensemble se décomposent lorsque, par un échange réciproque, ils peuvent donner naissance à un sel beaucoup moins fusible que chacun d'eux.

Les lois de Bertholet s'appliquent non-seulement aux oxacides, mais aussi aux hydracides, tels que les acides chlorhydrique, sulfhydrique, cyanhydrique.

Un sel étant donné, reconnaître son acide.

Sulfates. — Par l'eau de baryte, les sulfates solubles donnent un précipité blanc de sulfate de baryte, insoluble dans l'eau et dans l'acide azotique. A part le sulfate d'argent, les sulfates à froid ne cèdent leur base à aucun autre acide (le sulfate d'argent est décomposé par l'acide chlorhydrique).

Sulfites. — Sont décomposés par les acides puissants, sulfurique et chlorhydrique ; l'acide sulfureux se dégage et il est facile de le reconnaître à son odeur.

Azotates. — Les azotates fusent sur les charbons ardents, comme nous l'avons vu pour le salpêtre, c'est-à-dire qu'ils se décomposent; leur oxygène rend la combustion plus active et il se produit une flamme blanche.

Dans un petit tube, si on chauffe légèrement quelques planures de cuivre avec de l'acide sulfurique et un azotate, l'acide sulfurique déplace l'acide azotique, qui rencontre le cuivre et est en partie décomposé par lui ; il se forme un azotate de cuivre et il se dégage des vapeurs rutilantes caractéristiques d'acide hypoazotique.

Un sulfate d'acide de protoxyde de fer, dans lequel on laisse tomber quelques gouttes d'un azotate, se colore en brun : l'azotate est en partie réduit ; et il se dégage de l'acide hypoazotique qui colore la liqueur en brun.

Carbonates. — Ils font effervescence au contact des acides, parce que l'acide carbonique se dégage tumultueusement. L'acide carbonique produit dans l'eau de chaux un précipité blanc.

Phosphates. — Précipité jaune de phosphâte d'argent avec l'azotate d'argent.

Arséniates. — Précipité rouge brique avec l'azotate d'argent.

Chlorures. — Ils donnent avec l'azotate d'argent un précipité caillebotté, insoluble dans l'acide azotique, soluble dans l'ammoniaque ; ce précipité blanc brunit puis noircit à la lumière. C'est du chlorure d'argent.

Sulfures. — Reconnaissables à l'odeur d'œufs pourris qu'ils dégagent quand on les traite par l'acide sulfurique.

Étant donné un sel, trouver sa base. — Presque tous les sels sont solubles, soit dans l'eau, soit dans les acides. On les traite donc par l'eau, et s'ils ne sont pas solubles dans l'eau par l'acide chlorhydrique.

Quelques sels, tels que les sulfates de baryte de chaux et de plomb, sont insolubles dans l'eau et l'acide chlorydrique. Mais il est facile de les transformer en sels solubles, il suffit de les calciner avec un carbonate alcalin ; il se fait une double décomposition et en reprenant par l'acide azotique, on recueille un azotate dans lequel la base est précisément celle que l'on cherche.

Nous supposerons donc que l'on donne une liqueur renfermant un sel à déterminer.

On verse dans la liqueur de l'acide chlorhydrique. Il peut se produire un précipité, qui est un chlorure :

Si le chlorure est soluble à chaud dans beaucoup d'eau, on a un sel de plomb;

S'il est insoluble on ajoute de l'ammoniaque.	Le précipité se dissout. —	Sel d'argent.
	Le précipité noircit. . —	Sel de sous-oxyde de mercure.

— Si l'acide chlorhydrique ne produit pas de précipité, on traite par l'acide sulfhydrique :

1° Il y a un précipité. On le lave et on le traite par le sulfhydrate d'ammoniaque. .	Le précipité se dissout.	1er Groupe.
	Le précipité ne se dissout pas.	2e Groupe.

2° Il n'y a pas de précipité. On traite la liqueur primitive par le sulfhydrate d'ammoniaque. { Il y a un précipité. . . . . 3e Groupe. / Il n'y a pas de précipité. . . . . 4e Groupe.

Ceci fait, on sait donc à quel groupe appartient la base, et il sera facile de la reconnaître au moyen du tableau suivant :

PREMIER GROUPE

Sulfure noir.	La liqueur primitive donne, avec le sulfate de fer, un précipité brun d'or métallique, et cette liqueur est jaune.	Sels d'or.
	La liqueur primitive jaune est précipitée en jaune par le sel ammoniac et ne donne rien avec le sulfate de fer.	Platine.
Sulfure jaune. — On le grille dans un tube ouvert, et on obtient un oxyde.	Volatil.	Antimoine ou arsenic (facile à distinguer).
	Fixe.	Étain (SnO^2).
Sulfure brun marron.		Protoxyde d'étain (SnO).

DEUXIÈME GROUPE

Sulfure noir.	Insoluble dans l'acide azotique étendu.		Protoxyde de mercure.
	Soluble dans l'acide azotique, on ajoute de l'acide sulfurique.	Précipité blanc.	Plomb.
		Pas de précipité, on ajoute de l'ammoniaque.	Précipité blanc.	Bismuth.
			Liqueur bleu céleste.	Cuivre.

TROISIÈME GROUPE

Faire bouillir la liqueur avec l'acide azotique pour peroxyder le fer, puis ajouter un mélange d'ammoniaque et de chlorhydrate d'ammoniaque à chaud.	Il y a un précipité.	Couleur de rouille.	Sels de fer
		Blanc.	Alumine.
		Verdâtre.	Chrome.
	Pas de précipité; le sulfure donné par le sulfhydrate était.	Noir.	Nickel ou cobalt.
		Couleur chair.	Manganèse.
		Blanc.	Zinc.

QUATRIÈME GROUPE

Ajouter à la liqueur du carbonate d'ammoniaque et faire bouillir.	Il y a un précipité; on redissout par l'acide chlorhydrique et l'on verse du carbonate d'ammoniaque (il se forme dans la liqueur du chlorhydrate d'ammoniaque).	Pas de précipité.		Magnésie
		Précipité, ajouter acide sulfurique étendu.	Précipité insoluble.	Baryte.
			Précipité soluble dans un excès d'eau.	Chaux ou Strontiane.
	Pas de précipité.	La liqueur primitive, bouillie avec la potasse, dégage de l'ammoniaque.		Sel ammoniacal.
		Ne dégage rien.		Potasse ou soude que l'on distingue par le bichlorure de platine.

CHAPITRE IV

CHIMIE ORGANIQUE

Nature des substances organiques. — Principes constituants des matières végétales et animales — Applications à l'agriculture. — Fermentation alcoolique. — Corps gras. — Saponification. Huiles siccatives et non siccatives.

NATURE DES SUBSTANCES ORGANIQUES — PRINCIPES CONSTITUANTS DES MATIÈRES VÉGÉTALES ET ANIMALES

Le nombre des substances organiques et des substances qu'on en dérive par des réactions chimiques est immense, et cependant on est arrivé à classer tous ces corps d'une manière si méthodique que l'étude en est facile.

La chimie minérale nous a fait connaître une série de corps formés d'un petit nombre de molécules et doués en général d'une stabilité comparable à celle des roches qui leur donnent naissance.

La chimie organique au contraire étudie une série de substances dont les molécules sont complexes, dont la constitution est instable et se modifie sous les moindres influences; sous ce rapport, ces substances semblent partager la mobilité des êtres vivants qui leur ont donné naissance.

A part cette différence, les composés minéraux et les composés organiques ont des propriétés chimiques analogues, et ce serait un tort que de vouloir les séparer complétement : du reste, il est des corps comme l'eau, l'acide carbonique et l'ammoniaque que l'on peut placer aussi bien dans une section que dans l'autre. La théorie du dualisme, imaginée par Lavoisier, amenait à considérer comme absolument distinctes, les substances minérales et organiques; aujourd'hui on classe les corps par familles ayant une constitution moléculaire analogue, les diverses molécules élémentaires, simples ou complexes, pouvant être remplacées par des molécules similaires, et l'on est tout étonné de voir comment on peut d'un composé simple déduire par substitutions de molécules le composé le plus complexe ; il est à remarquer que ce n'est point là une simple théorie : l'expérience en plus d'un cas en a montré l'exactitude.

Composition d'un végétal. — M. Boussingault a fait la curieuse expérience suivante : sous une cloche où il introduisait un mélange d'oxygène, d'azote, d'eau et d'acide carbonique avec traces d'ammoniaque, dans un sol artificiel ne renfermant point de substances organiques, il semait des graines, et les laissait pousser et se développer. Or il fallait que la plante se fût nourrie uniquement par la réduction de l'acide carbonique de l'eau et de l'ammoniaque empruntés à l'atmosphère ; la plante s'est assimilé de la sorte du carbone, de l'hydrogène et de l'azote ; elle va servir maintenant à nourrir les animaux : il faut donc considérer le végétal comme un intermédiaire emmagasinant pour la nourriture des animaux les principes de l'atmosphère.

L'atmosphère seule est donc le réservoir de la vie; la nourriture des êtres vivants en sort et y retourne.

De ce qui précède il résulte que toutes les substances organiques peuvent renfermer au plus quatre éléments : carbone, hydrogène, oxygène, azote, et c'est en effet ce que l'expérience vérifie.

Ainsi, chose admirable, ces quatre éléments combinés, en proportion diverse, donnent des corps aussi dissemblables que la gomme et les graisses, que la fibre ligneuse et les parfums ou les poisons, que l'alcool et la matière cérébrale.

Par quelles réactions les êtres vivants arrivent-ils à produire tant de choses opposées en usant de quatre éléments simples toujours les mêmes ? C'est par le mécanisme de la vie, que l'homme jusqu'ici n'a pu saisir, et ce mécanisme général se complique encore du mécanisme particulier par lequel chaque individu sécrète et prépare en lui-même tantôt un poison violent, tantôt un aliment exquis.

Quand la vie abandonne un être vivant, tous ces composés si complexes ne tardent pas eux-mêmes à mourir, à se résoudre en leurs éléments simples ; ceux-ci retournent au fonds commun, à l'atmosphère, qu'ils ne tarderont pas à quitter de nouveau pour fournir une nouvelle course circulaire.

Les quatre éléments dont sont formés les substances organiques ne sont pas toujours réunis ; nombre de corps, l'alcool, les éthers, ne renferment pas d'azote ; certaines huiles, et certains gaz, comme le gaz des marais, ne renferment que du carbone et de l'hydrogène ; enfin le cyanogène ne renferme que du carbone et de l'azote.

Un seul élément, le carbone, est toujours présent, et semble indispensable à la vie des corps organisés.

Par leur excessive mobilité, les molécules organiques doivent être très-sensibles aux actions physiques et chimiques ; il est donc facile de les dédoubler en composés plus simples et finalement en leurs éléments simples. Jusqu'à présent on n'a guère pu produire l'inverse et passer du simple au composé ; la vie semble nécessaire à cela. Toutefois, M. Berthelot est arrivé avec de l'eau et du gaz oléfiant ($C^4 H^4$) à produire de l'alcool.

$$C^4H^4 + {}^2HO = C^4H^6O^2 —$$

Il est peu de matières organiques fixes ; quelques-unes sont volatiles, et presque toutes se décomposent par la chaleur, en donnant de l'eau, de l'acide carbonique, de l'oxyde de carbone, de l'azote, des carbures d'hydrogène, des huiles empyreumatiques, de l'acide acétique, avec de l'ammoniaque et de l'acide cyanhydrique quand elles sont azotées.

La plupart des matières organiques, dans une atmosphère chaude et humide, se décomposent et présentent les phénomènes qu'on appelle fermentation, putréfaction.

Le chlore attaque toutes les matières organiques, soit en s'emparant de leur hydrogène et les décomposant, soit en remplaçant l'hydrogène molécule à molécule pour former de nouveaux corps.

L'ammoniaque se substitue quelquefois à des molécules d'hydrogène.

L'acide sulfurique réduit les matières organiques, en leur enlevant une ou plusieurs molécules d'eau dont il est avide.

L'acide azotique est un oxydant énergique ; presque toujours il brûle les matières organiques.

La plupart des matières organiques sont des corps indifférents ; toutefois il y en a plusieurs qui sont des acides ou des bases analogues aux bases et aux acides minéraux.

Étant donné un corps, il faut toujours commencer par l'analyser, c'est-à-dire par chercher quels éléments il renferme et dans quelles proportions ; nous n'entrerons pas dans les détails de l'analyse organique, mais voici en quoi elle consiste : on brûle la substance par l'oxygène, il se forme de l'acide carbonique et de l'eau, que l'on recueille et que l'on pèse (le composé auquel on emprunte l'oxygène est le chlorate de potasse ou l'oxyde de cuivre, que l'on mélange à la la substance et l'on porte le tout à une température élevée). L'azote est recueilli à l'état gazeux. Les cendres minérales sont pesées à part. L'oxygène se déduit par différence.

Application à l'agriculture. — Nous avons vu plus haut comment un végétal pouvait se développer dans une atmosphère composée d'ammoniaque, d'acide carbonique et d'eau. Cette expérience est curieuse ; mais, en réalité, les choses se passent autrement dans la nature. Outre les substances purement organiques, la plupart des plantes renferment une faible portion de matières minérales que l'on retrouve dans les cendres.

Pour faire une culture parfaite d'une plante donnée, il est donc nécessaire d'introduire dans le sol, s'il ne les possède pas, les substances minérales nécessaires à la vie de la plante. Ainsi, la tige des céréales telles que le blé, doit sa rigidité à un peu de silice ; le blé contient toujours des phosphates que l'on retrouve dans ses cendres (et, en effet, les phosphates sont nécessaires à l'alimentation des animaux puisqu'ils forment la charpente osseuse) ; dans le vin nous rencontrons toujours du tartrate de potasse ; tous les végétaux renferment un peu de calcaire ; certains ont besoin de soude et de potasse. On comprend, d'après cela, qu'un bon engrais doit contenir, outre les substances organiques, des sels calcaires, ou des phosphates, ou des sels alcalins, etc., suivant la nature de culture considérée, et l'on ne saurait trop propager dans les campagnes l'usage de ces engrais minéraux.

Il est nécessaire d'y joindre une grande masse de matières organiques : les plantes se nourrissent en grande partie dans l'atmosphère, à laquelle elles empruntent surtout leur carbone, leur hydrogène et leur oxygène. L'azote provient en grande partie de l'engrais ; toutefois, l'azote contenu dans une plante est toujours en quantité supérieure à celle que renferme l'engrais, et cet excès est emprunté à l'atmosphère. Sous l'influence de l'électricité, il se forme dans l'air de l'azotate d'ammoniaque que la pluie entraîne dans le sol, et qui sert à la nourriture des végétaux.

L'azote est la base de la végétation, et les meilleurs engrais sont ceux qui, par leur décomposition, donnent la plus grande quantité d'azote, non pas à l'état de gaz, mais à l'état de composés ammoniacaux facilement assimilables, dont s'emparent les racines. On comprend, d'après cela, que des engrais agissent plus ou moins vite, suivant qu'ils renferment l'azote sous la forme de sels plus ou moins volatils, suivant que la constitution physique de l'engrais permet une décomposition plus rapide. C'est ainsi que le guano pulvérulent agira très-vite et sera consommé dans l'année, tandis que l'effet d'un fumier pourra durer plusieurs années.

Les matières très-azotées sont le meilleur engrais, elles excitent vivement la végétation du sol, mais il faut bien se garder de croire que, seules, elles puissent suffire à la culture : nous avons plus haut que l'union des matières minérales était nécessaire ; on arriverait très-vite avec des engrais azotés à enlever au sol les principes minéraux nécessaires, et il faut absolument les remplacer ; on s'explique par là qu'un engrais puisse donner de meilleurs résultats

qu'un autre engrais plus azoté, parce qu'il renfermera des sels utiles au sol.

Nous sommes persuadé que le succès du guano tient pour beaucoup aux sels, tels que les phosphates, qu'il renferme.

Lorsqu'on emploie des engrais animaux, tontisses de laine, viandes ou sang provenant des abattoirs, il faut avoir soin de mélanger avec eux du plâtre ou de la craie, car ils sont très-pauvres en matières minérales.

La plus grosse masse d'engrais est fournie par les fumiers de ferme. Le fumier de ferme est un engrais complet, en ce sens que les déjections animales l'ont saturé de matières azotées solubles, et que la paille renferme les substances minérales précédemment enlevées au sol et les lui restitue.

Pour avoir l'engrais qui convient à un terrain donné, il faudrait analyser la récolte, savoir ce qu'elle a enlevé au sol de matières organiques ou minérales, et constituer un mélange de sels et de fumiers qui renferme la même quantité de toutes ces matières sous une forme assimilable par les plantes.

Quelques chimistes sont entrés dans cette voie; à leur tête il faut placer MM. Payen et Boussingault; le laboratoire de l'École des ponts et chaussées, dirigé par MM. Hervé-Mangon et Durand-Claye, s'occupe aussi fort activement de cette impulsion nouvelle à donner à l'agriculture. Ce sont là des études qui intéressent au plus haut point la fortune du pays.

Fermentation alcoolique. — *Des sucres.* — Les sucres sont des composés à saveur douceâtre susceptibles d'éprouver la fermentation alcoolique.

On les range en deux grandes classes : 1° sucre cristallisable, que l'on trouve dans la canne, la betterave, l'érable, la châtaigne et dans nombre de fruits; on l'appelle sucre de canne ou de betterave; 2° sucre incristallisable que l'on trouve dans les raisins et dans tous les fruits acides. On l'obtient encore en faisant agir l'acide sulfurique étendu sur l'amidon ou fécule (la fécule se trouve dans les pommes de terre sous forme de grains ronds que l'on extrait en lavant la pulpe des pommes de terre préalablement broyées; on donne spécialement le nom d'amidon à la fécule que l'on retire du froment).

Le sucre cristallisable se transforme facilement en sucre incristallisable, et même cette transformation s'opère toujours quand le phénomène de la fermentation a lieu. On n'a pu, jusqu'à présent, faire la transformation inverse et passer du sucre incristallisable au sucre de canne.

Le sucre de canne, dont les propriétés sont bien connues, a pour formule $C^{12}H^{11}O^{11}$, ou mieux $C^{12}H^{9}O^{9},2HO$, car il y a deux équivalents d'eau que l'on peut remplacer par des bases métalliques, telles que la chaux, et il se forme des sucrates.

Pour extraire le sucre de la canne, on broie la canne (*arundo saccharifera*) entre des cylindres cannelés; le jus recueilli s'appelle vesou, on le chauffe dans des chaudières, on le concentre et on recueille le sucre cristallisé.

Le sucre de betterave se prépare en broyant la betterave, soumettant la pulpe à l'action de presses hydrauliques. Le jus est recueilli et défèqué au moyen de la chaux (la défécation a pour but de neutraliser par la chaux les acides organiques que renferme le jus). On filtre ensuite sur du noir animal, puis on l'évapore dans des chaudières.

On obtient du sucre brut que l'on blanchit par le raffinage en le mélangeant de noir animal et de sang défibriné, qui ne contient plus que de l'albumine. Toutes les matières impures sont précipitées et on fait cristalliser le sirop dans des moules coniques.

Le sucre incristallisable, que l'on trouve à la surface des raisins secs, et que

l'on rencontre dans les fruits acides, s'appelle glucose. On le prépare en faisant agir l'acide sulfurique sur l'amidon en présence de la vapeur d'eau, puis on sature l'acide par la chaux. Il existe encore dans l'urine des diabétiques.

De la fermentation. — Sous l'influence d'une température modérée de 20° à 25°, en présence de l'humidité, au contact de l'air et d'une substance organisée azotée qu'on appelle ferment, les matières organiques se décomposent et se résolvent en éléments plus simples; elles subissent ce phénomène particulier qu'on appelle fermentation, dans lequel le ferment ne cède rien, ne se détruit pas et semble n'agir que par sa présence, par une sorte de communication de mouvement.

Fermentation alcoolique. — C'est ainsi que par la fermentation, le glucose ou sucre de raisin $C^{12}H^{12}O^{12}$ se décompose et se dédouble en acide carbonique et alcool :

$$C^{12}H^{12}O^{12} = 4CO^2 + 2(C^4H^6O^2).$$

La fermentation marche rapidement et il suffit d'une faible quantité de ferment ; mais avec le sucre de canne, la fermentation ne marche que lentement et il faut beaucoup de ferment ; c'est que le sucre de canne se transforme d'abord en glucose, ainsi que le montrent les réactifs.

Le phénomène est facile à produire en introduisant dans un flacon un mélange de glucose et d'un peu de levûre de bière (ferment).

Quelquefois le ferment n'existe pas, mais il tend à se produire à l'air ; c'est ce qui arrive pour les fruits sucrés.

D'autres fois il existe, mais se détruit à mesure qu'il produit son effet ; c'est ce qui arrive pour le mélange du glucose et de la levûre de bière.

Enfin, il arrive aussi que le ferment naît dans la substance organique, s'y développe et s'y multiplie. C'est ce que nous voyons dans la fabrication de la bière : on prend de l'orge humectée que l'on fait germer, il se développe de la diastase, substance particulière qui possède la propriété de transformer l'amidon en glucose ; l'orge germée est desséchée, puis moulue et mélangée à de l'orge ordinaire dans des cuviers remplis d'eau à 75°. — Il se forme du glucose, on ajoute un peu de levûre ; la fermentation s'établit, il se dégage beaucoup d'acide carbonique et on recueille l'écume, qui n'est autre que de la levûre dont le poids est bien supérieur à celui de la levûre introduite : le ferment s'est donc développé aux dépens de la matière organique en présence.

La fermentation du glucose n'est pas un simple dédoublement, comme le montre la formule de plus haut ; en effet, en prenant les poids de l'acide carbonique et de l'alcool formés on trouve un total inférieur au poids du glucose employé ; la différence est faible, mais elle existe toujours, et, en effet, M. Pasteur a montré qu'il se formait un acide particulier (l'acide succinique qu'on trouve dans tous les vins) et une substance grasse, la glycérine.

Ainsi la décomposition du glucose n'est pas aussi simple qu'elle paraissait au premier abord ; il est même probable qu'il se forme encore d'autres substances (huiles ou essences) en quantités minimes. En somme, cette production d'acide succinique et de glycérine n'est qu'un phénomène accessoire, peu important en pratique.

Chaque ferment a une manière d'agir toute spéciale et produit des dédoublements constants et caractéristiques ; tel ferment agit sur certaines substances et n'agit point sur d'autres qui cependant sont attaquées par un autre ferment.

Constitution du ferment. — En étudiant le ferment au microscope, on crut

pouvoir le considérer comme une matière vivante susceptible de se multiplier par bourgeonnement comme certains animaux inférieurs; c'est cette sorte de végétation qui décompose le sucre en alcool et acide carbonique.

D'autres prétendent qu'un ferment est un corps éminemment décomposable et animé de vibrations perpétuelles, qui transmises aux molécules de corps infiniment voisins, les dédoublent à leur tour; le phénomène à ce point de vue n'est plus qu'une communication de mouvement ou de force vive.

Voici l'explication qui résulte des travaux de M. Pasteur : le ferment, tel que la levûre, est un végétal microscopique composé de globules qui se développent par bourgeonnement, et qui sont formés de cellulose (la cellulose est la trame des tissus végétaux) de matières azotées, et de sels minéraux, surtout des phosphates alcalins et terreux. Les globules trouvent dans le sucre les matières azotées et minérales nécessaires à leur existence, ils y vivent et s'y développent en décomposant le sucre, à qui ils prennent de quoi former la cellulose et la matière des globules; le reste du sucre, c'est-à-dire l'alcool, l'acide carbonique, l'acide succinique et la glycérine, se dégage. La levûre augmente donc de poids aux dépens du sucre.

Une preuve de cette explication, c'est qu'avec du sucre bien pur, la fermentation ne se produit pas à moins qu'on n'ajoûte de l'ammoniaque pour former les matières azotées et des cendres renfermant des phosphates.

La levûre de bière est un des rares ferments qui vivent à l'air; presque tous les autres y meurent, tandis qu'ils se conservent dans une atmosphère d'acide carbonique ou d'hydrogène. De petites quantités d'acide activent la fermentation; une proportion notable l'arrête; les alcalis la retardent; tous les poisons, tels que la strychnine et l'arsenic, tuent le ferment, comme ils tuent tout ce qui vit ou végète.

Outre la fermentation alcoolique, on connaît surtout la fermentation lactique, butyrique (fermentation des graisses et fromages), visqueuse. La fermentation visqueuse est due à un ferment analogue à la levûre; c'est elle qui cause la graisse des vins blancs; on l'arrête par le tannin, qui détruit le ferment. Le vin rouge, renfermant du tannin qu'il emprunte à la rafle des grappes, n'est pas sujet à la fermentation visqueuse.

La fermentation lactique est due à l'action de la caséine, principe azoté du lait sur le glucose ou sur le lactose (sucre de lait),

$$C^{12}H^{12}O^{12} = 2(C^6H^6O^6)$$

$C^6H^6O^6$, ou mieux $C^6H^5O^5,HO$, est l'acide lactique.

La caséine putréfiée est un autre ferment qui développe de l'hydrogène, de l'acide carbonique et de l'acide butyrique.

$$C^{12}H^{12}O^{12} = 4Co^2 + 4H + C^8H^8O^4 —$$

Vin. — Le vin se produit par la fermentation alcoolique du sucre de raisin, sous l'influence de la chaleur. Il se forme une solution alcoolique, qui dissout la matière colorante de la rafle. Dans la fermentation, il y a production de certaines huiles essentielles auxquelles on doit le bouquet des vins.

Alcool. — L'alcool existe tout formé dans le vin, et c'est par la distillation qu'on le retire des vins communs.

Le vin est chauffé dans la chaudière C, et les vapeurs chargées d'alcool passent en C', seconde chaudière, chauffée moins directement que la première, et qui

communique avec elle; le liquide de C′ est plus riche en alcool que celui de C, mais il est à moins haute température. Il se dégage une vapeur aqueuse chargée d'alcool qui se rend à la partie inférieure du rectificateur R dans un tube en hé-

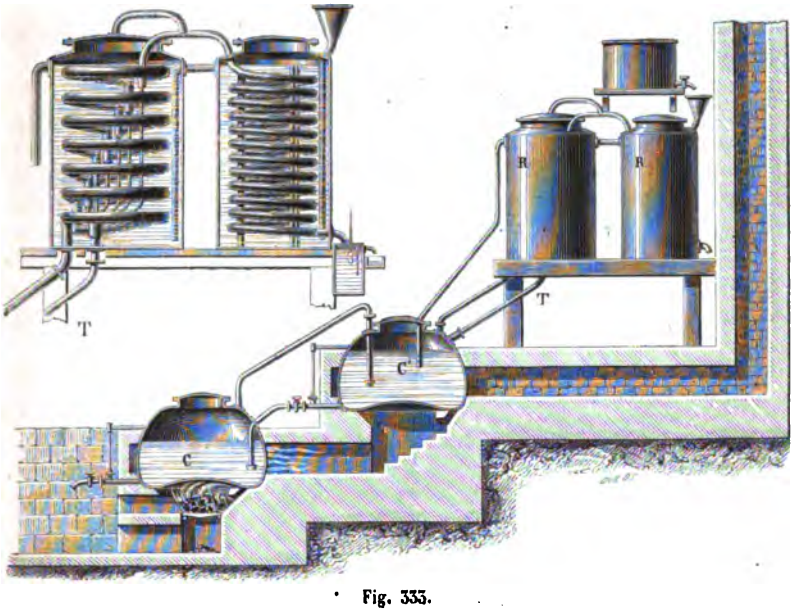


Fig. 333.

lice qu'elle remonte; l'eau, moins volatile que l'alcool, se condense dans cette hélice et est ramenée, par des tuyaux réunis en T, dans la chaudière C′; cette eau est évidemment chargée d'alcool. L'alcool passe de là dans le serpentin R′, où il se condense, et s'écoule par un robinet dans un vase latéral. Le liquide qui sert à refroidir le serpentin et le rectificateur est le vin à distiller, qui du rectificateur passe dans la chaudière C′. De la chaudière C s'écoule un liquide purgé d'alcool, qu'on appelle vinasse.

L'alcool se prépare encore au moyen de la betterave, dont on recueille le jus sucré; on mêle ce jus à de la levûre, sous l'influence d'une certaine chaleur et en présence de l'eau; puis on distille dans un alambic et on recueille l'alcool.

L'alcool anhydre s'obtient en distillant plusieurs fois l'alcool ordinaire sur de la chaux vive.

L'alcool pur est un liquide incolore, mobile, caustique et brûlant parce qu'il est très-avide d'eau. Injecté dans le sang, il le coagule et produit la mort subite. Densité 0,795, bout à 78°, n'a pas encore été solidifié. La vapeur d'alcool mélangée à l'air détone par la chaleur.

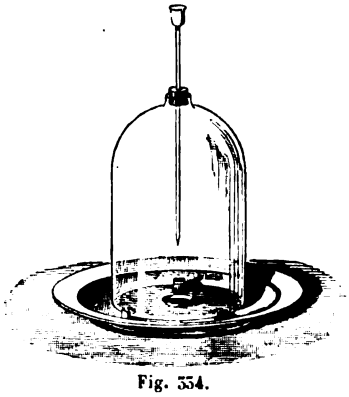


Fig. 334.

Dans un tube effilé on met de l'alcool, qui tombe goutte à goutte sur du noir de platine renfermé dans une capsule; l'alcool s'oxyde et passe d'abord à l'état

d'aldéhyde $C^4H^4O^2$ (en perdant deux équivalents d'hydrogène), puis à l'état d'acide acétique $C^4H^4O^4$.

Le chlore enlève de l'hydrogène à l'alcool et produit d'abord de l'aldéhyde puis un corps appelé chloral, qui a la composition de l'aldéhyde où trois molécules de chlore auraient remplacé trois molécules d'hydrogène :

$$C^4H^6O^2 \text{ (alcool)} + 2Cl = 2ClH + C^4H^4O^2 \text{ (aldéhyde)}$$
$$C^4H^4O^2 + 6Cl = 3ClH + C^4(HCl^3)O^2 \text{ (chloral)}$$

Le potassium agit sur l'alcool et se substitue à une molécule d'hydrogène pour donner le corps $C^4(H^5K)O^2$ de la famille des alcools.

Les vins et eaux-de-vie sont un mélange d'eau, d'alcool, et d'huiles essentielles à parfum plus ou moins agréable

Le malaga contient	15 0/0	d'alcool.
Le sauternes.	15 0/0	—
Le château-margaux ou laffite.	8,7 0/0	—
Le bon vin de Bourgogne.	11 0/0	—
Le champagne.	11,6 0/0	—
Vin au détail à Paris.	8,8 0/0	—
Cidre très-fort.	9 0/0	—
Cidre très-faible.	4,8 0/0	—
Bière nouvelle.	3 0/0	—
Bière de Paris.	1,9 0/0	—

Le tafia, le rhum s'obtiennent par la fermentation alcoolique des mélasses extraites de la canne à sucre ; le kirsch est dû à la fermentation des merises ; le rack à la fermentation du riz ; le genièvre à la distillation de l'alcool sur des baies de genièvre.

Action de l'acide sulfurique sur l'alcool. — L'acool s'unit aux acides minéraux pour former des composés qui sont eux-mêmes des acides. Ainsi l'acide sulfurique concentré et l'alcool s'unissent et forment l'acide sulfovinique ($2SO^3$, $C^4H^6O^2$) que l'on peut recueillir en cristaux.

Éther. — Par la chaleur, à 136°, l'acide sulfurique décompose l'alcool, lui enlève un équivalent d'eau et il se dégage de l'éther (C^4H^5O).

$$C^4H^6O^2 = Ho + C^4H^5O.$$

L'éther est un liquide très-mobile, à odeur pénétrante ; il bout à 350°, il est très-volatil ; aussi produit-il sur la peau une sensation de fraîcheur. C'est un corps combustible et détonant. Mélangé à l'acide sulfurique, il reforme l'acide sulfovinique.

Le chlore peut se substituer aux diverses molécules d'hydrogène que renferme l'éther et l'on obtient des composés bien définis :

$$C^4H^5O, \quad C^4(H^4Cl)O, \quad C^4(H^3Cl^2)O, \quad C^4(H^4Cl)O, \quad C^4Cl^5O.$$

L'alcool traité par les acides chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique, etc., donne des composés tout à fait analogues à l'éther sulfurique et qu'on appelle éthers chlorhydrique, bromhydrique etc... Ils ont pour formule

$$C^4H^5Cl, \quad C^4H^5Br, \quad C^4H^5I$$

Tous les éthers forment une famille qui a pour radical la molécule C^4H^5, qu'on

appelle éthyle, et l'éther ordinaire est de l'oxyde d'éthyle C^4H^5,O ; les autres sont des chlorure, brômure d'éthyle.

Si l'on fait agir sur l'alcool les acides oxygénés, on obtient encore des corps de propriétés analogues aux éthers; on les appelle éthers composés, et ce sont des sels d'oxyde d'éthyle; ainsi l'éther azotique n'est autre que de l'azotate d'éthyle.

$$C^4H^5O,\quad AzO^5$$

Des alcools. — Nous avons donné tous les développements qui précèdent pour faire voir comment du type $C^4H^6O^2$, alcool vinique, on dérivait une série énorme de corps très-complexes, éthers simples et composés, aldehydes, acide acétique.

Il est d'autres corps, qu'on a appelés par analogie alcools qui, possédant une formule analogue à celle de l'alcool ordinaire, fournissent la même série de substitutions et de composés.

Ainsi, l'esprit de bois, ou alcool méthylique, a pour formule $C^2H^4O^2$; il donne un éther méthylique ou oxyde de méthyle C^2H^3O, et des chlorure, azotate, sulfate de méthyle, dont les formules sont C^2H^3Cl, C^2H^3O, AzO^5, etc.

Le chlorure de méthyle, C^2H^3Cl donne par l'action du chlore le corps C^2HCl^3, anesthésique bien connu, le chloroforme.

On connait de même la série de l'alcool propylique $C^6H^8O^2$, de l'acool butylique $C^8H^{10}O^2$, de l'alcool amylique $C^{10}H^{12}O^2$ (huile de pomme de terre).

La formule générale des alcools est $C^{2m}H^{2m+2}O^2$, et celle des éthers simples correspondant $C^{2m}H^{2m+1}O$; celle des éthers composés tels que les éthers azotiques $(C^{2m}H^{2m+1}O,AzO^5)$.

D'un alcool quelconque $C^{2m}H^{2m+2}O^2$ dérive toujours par enlèvement de deux molécules d'hydrogène, une aldéhyde $C^{2m}H^{2m}O^2$: puis, si l'oxydation continue, un acide $C^{2m}H^{2m}O^4$.

L'*acide dérivé* du 1er alcool, (alcool méthylique $C^2H^4O^2$) est l'acide formique $C^2H^2O^4$, ou C^2HO^3, HO, dans lequel l'équivalent d'eau peut être remplacé par une base pour former un sel. L'acide formique s'obtient en distillant des fourmis dans l'eau.

L'*acide acétique* $C^4H^4O^4$ ou $C^4H^3O^3$, HO dérive de l'alcool ordinaire par oxydation; on le rencontre dans beaucoup de plantes, il est très-employé dans l'industrie : étendu d'eau, il constitue le vinaigre, que l'on prépare en laissant exposée à l'air une boisson alcoolique.

En Allemagne, pour préparer le vinaigre rapidement, on se sert d'un tonneau à trois compartiments; en haut est un liquide alcoolique qui s'écoule par des bouts de ficelle sur des copeaux de hêtre, que l'air pénètre ; le vinaigre tombe dans le troisième compartiment et s'écoule par un robinet.

Fig. 355.

On prépare aujourd'hui de grandes quantités de vinaigre par la distillation du bois.

De l'alcool butyrique $C^8H^{10}O^2$ dérive l'acide butyrique $C^8H^8O^4$, qui par oxydation donne l'acide succinique $C^8H^6O^8$.

Outre les alcools $C^{2m}H^{2m+2}O^2$, on trouve des familles analogues de corps appelés alcoolides, et qui ont pour formules $C^{2m}H^{2m}O^2$ donnant des acides $C^{2m}H^{2m-2}O^4$, etc... Nous voulons montrer par là combien les réactions de chimie organique sont simples et se déduisent facilement les unes des autres. On obtient de la sorte des familles de corps, et la classification en est bien facile.

Glycols. — Entre les alcools et la glycérine se placent des corps jouissant de propriétés mixtes, qui s'appellent pour cette raison glycols, et qui ont pour formule $C^{2m}H^{2m+2}O^4$, quand la formule de l'alcool correspondant est $C^{2m}H^{2m+2}O^4$. Et les glycols donnent naissance par oxydation à une série d'acides $C^{2m}H^{2m}O^2$, parmi lesquels on trouve l'acide lactique ($C^6H^6O^6$)

Corps gras. Saponification. — Les animaux et les végétaux fournissent une grande quantité d'huiles et de graisses, qui sont des substances neutres connues sous le nom de corps gras.

Il ne faut pas confondre les huiles de cette espèce avec les huiles ou essences volatiles ; toutes tachent le papier, mais les dernières forment une tache fugitive, et les premières une tache permanente ; celles-ci n'ont ni saveur ni odeur, sont onctueuses au toucher ; celles-là au contraire ont une odeur forte et pénétrante et rendent la peau rugueuse.

Quand les corps gras neutres sont conservés pendant longtemps, ils rancissent ; il s'y développe des acides dont l'odeur est souvent désagréable. Cette particularité est produite par l'absorption de plusieurs équivalents d'eau, et si l'absorption est lente à la température ordinaire, elle est très-rapide à une haute température, 200° par exemple. Un ferment active la décomposition.

On reconnaît que le corps gras s'est transformé en deux éléments : l'un acide, l'autre neutre possédant une saveur douce et sucrée ; ce dernier est la glycérine ou principe doux des huiles.

Ce dédoublement des corps gras tend à se produire sous l'influence d'une base qui détermine la formation de l'acide organique, et aussi sous l'influence d'un acide énergique devant lequel la glycérine, corps neutre, joue le rôle de base.

Ce phénomène de dédoublement est ce que l'on appelle la saponification.

Les corps gras, d'après cela, sont analogues aux éthers neutres, tels que l'éther azotique C^4H^5O,AzO^5, lequel en présence d'une base et de l'eau, ou même de l'eau seule, absorbe de l'eau et se dédouble en un acide AzO^5,HO, qui s'unit à l'alcali et un corps neutre.

L'acide gras formé dans la saponification est l'un des acides stéarique, margarique, oléique ; la substance neutre est toujours la glycérine.

On a pu reproduire des corps gras en combinant ensemble les acides gras nommés plus haut avec la glycérine (il y a de l'eau éliminée).

L'acide gras et la glycérine n'existent pas formés de toutes pièces dans le corps gras ; on en détermine la formation généralement en faisant agir un alcali hydraté sur le corps gras ; on obtient de la glycérine et un savon alcalin.

Glycérine. — S'obtient comme résidu de la fabrication des savons. Lorsqu'on fait un savon calcaire en mettant en présence un corps gras et de la chaux, il reste une liqueur aqueuse, d'où l'on précipite la chaux en dissolution par un courant d'acide carbonique ; on évapore, et l'on obtient la glycérine. A 250°, les corps gras sous l'action de la vapeur d'eau se dédoublent ; la glycérine reste dissoute et on l'obtient par évaporation.

C'est un corps sirupeux, incolore, à saveur sucrée, non cristallisable, soluble en toute proportion dans l'eau et l'alcool.

Par la chaleur, la glycérine s'altère et perd quatre équivalents d'eau en donnant de l'acroléine :

$$C^6H^8O^6 \text{ (glycérine)} = 4Ho + C^6H^4O^2$$

En présence des alcalis, la glycérine chauffée donne un mélange d'acétate et de formiate alcalin.

Composition des corps gras naturels. — Les corps gras naturels sont retirés de la graine des végétaux (colza, pavot, noix, amandes, etc.) ou de la pulpe des fruits (olives) ; les graisses animales sont solides (suif, axonge, cire). Ces corps gras naturels sont le plus souvent des mélanges de substances grasses différentes, dont une domine plus ou moins ; parmi ces substances, les principales sont la margarine, la stéarine, l'oléine, et le blanc de baleine.

Margarine. — La margarine est une substance cristallisable et fusible à basse température, que l'on rencontre dans des corps gras d'origine animale et dans des huiles végétales, mélangée presque toujours à de l'oléine ou à de la stéarine.

La margarine s'extrait de l'huile d'olive par congélation ; on presse la masse obtenue pour en chasser l'oléine. En recommençant plusieurs fois, on obtient la margarine pure, qui fond à 49° et qui, par la saponification, se transforme en glycérine et acide margarique.

La margarine peut s'extraire encore de la graisse d'oie ou de la graisse d'homme, qui ont même composition que l'huile d'olive.

Stéarine. — On la rencontre dans beaucoup de corps gras d'origine animale ou végétale ; mais on l'extrait surtout du suif de bœuf et de mouton. La stéarine est toujours mélangée à l'oléine, que dissout l'éther, et à la margarine, que dissout l'alcool ; au moyen de lavages à l'éther et à l'alcool, on arrive à obtenir la stéarine à peu près pure.

La stéarine fond à 45° ; en refroidissant, elle ne ressemble plus au suif, mais prend une apparence cristalline analogue à celle de la cire.

Elle cristallise en paillettes nacrées. M. Berthelot a reproduit artificiellement la stéarine.

Par la saponification, elle donne de la glycérine et de l'acide stéarique.

Oléine. — Se trouve avec la margarine dans les huiles grasses, mais on l'en sépare difficilement. Les huiles grasses siccatives renferment un corps analogue à l'oléine, que l'on retire de l'huile d'olives ou de l'huile d'amandes douces.

Par la saponification, l'oléine donne de la glycérine et de l'acide oléique.

Blanc de baleine ou cétine. — Le blanc de baleine ou spermacéti est une matière grasse qu'on trouve dans les cavités de la tête des grands cétacés tels que la baleine. Elle n'est point formée par l'union d'un acide avec de la glycérine et renferme un composé blanc cristallisable, la cétine. La cétine se dédouble, par saponification, en acide palmitique et en éthal (alcool analogue à l'alcool vinique).

De même, la cire des abeilles est formée d'acide cérotique, mélangé à de la myricine. Par la saponification, la myricine se décompose en acide palmitique et alcool mélissique (de la série de l'alcool vinique, $C^{60}\ H^{62}\ O^2$).

Fabrication des huiles et bougies. — Les huiles s'obtiennent en comprimant à froid la graine ou le fruit, au moyen de presses hydrauliques. C'est ainsi qu'on prépare les huiles à manger et les bonnes huiles à brûler. On retire du colza une seconde quantité d'huile de qualité inférieure, en comprimant le tourteau entre des plaques chauffées à 60° ; l'huile ainsi obtenue entraîne des

matières azotées putrescibles et elle rancit très-vite, à moins qu'on ne la purifie en l'agitant avec de l'acide sulfurique, qui charbonne et détruit les ferments.

Pour les bougies, autrefois on employait la cire ; aujourd'hui on recourt à un mélange d'acides margarique et stéarique qu'on obtient par la saponification des suifs. Autrefois, on faisait bouillir le suif avec de la chaux et de l'eau ; il se formait un savon calcaire insoluble, que l'on décomposait par l'acide sulfurique étendu. Aujourd'hui, on saponifie les suifs en les distillant dans un courant de vapeur surchauffée à 250°, et cela permet d'employer les corps gras les plus sales, les détritus d'abattoirs et jusqu'à l'eau de vaisselle ; dans les chaudières on ajoute un peu d'acide sulfurique. Le liquide recueilli est formé d'une couche huileuse qui se prend en masse par refroidissement et d'une couche aqueuse renfermant la glycérine.

Le moulage des acides margarique et stéarique est assez difficile en ce sens qu'il faut les remuer sans cesse et les laisser refroidir lentement pour empêcher la cristallisation.

Fabrication des savons. — Les savons sont des sels résultant de l'union des acides gras avec les oxydes métalliques.

Les savons à base de potasse, soude et ammoniaque, sont seuls solubles dans l'eau, ils le sont aussi dans l'alcool ; ce sont les seuls usités dans les arts. Tous les autres savons sont généralement insolubles.

La consistance d'un savon est proportionnelle à la fusibilité de l'acide gras qui le forme.

Les savons à base de soude sont toujours plus résistants que les savons à base de potasse ; ce sont les savons durs.

Les savons durs, ou à base de soude, se préparent avec l'huile d'olive, le suif et diverses graisses. A Marseille, on se sert de l'huile d'olive.

Les savons mous s'obtiennent au moyen des huiles de graines (lin et colza). Les huiles siccatives donnent des savons plus mous que les huiles non siccatives.

Généralement les savons mous sont colorés en vert par du sulfate de cuivre ou toute autre teinture ; ils servent à la préparation de la laine (foulage et dégraissage).

Les savons durs servent aux usages ordinaires ; ils sont blancs. On les parfume avec des essences, lorsqu'ils servent à la toilette.

On voit maintenant des savons sphériques transparents d'un bel aspect. On les obtient en dissolvant le savon ordinaire dans l'alcool ; on chauffe et on coule le sirop dans des moules.

Le meilleur savon est celui de Marseille, qu'on prépare avec de l'huile d'olive, non colorée et récemment préparée, et avec des lessives de soude. L'opération, assez simple, s'effectue dans de grandes chaudières.

Quand la lessive est peu abondante, comme les soudes employées renferment toujours de l'alumine et du fer, il se forme des savons à base d'alumine et de fer, qui sont peu solubles et se disséminent dans la masse du savon, auquel il donne l'aspect marbré bien connu. Quand il y a beaucoup de lessive, les savons d'alumine et de fer se déposent et le savon blanc nage à la surface.

Mais le savon blanc renferme 50 pour 100 d'eau, et le savon marbré 30 à 35 pour 100. Il y a donc grand avantage à acheter du savon marbré.

Huiles grasses. — Nous avons déjà distingué deux sortes d'huiles : 1° les huiles grasses formant sur le papier une tache permanente et susceptibles de donner la saponification, onctueuses et de saveur douce ; 2° les huiles essentielles, donnant sur le papier une tache fugitive, ayant une saveur âcre et une odeur forte.

Toutes les huiles sont plus légères que l'eau.

Huiles siccatives et non siccatives. — Les huiles grasses exposés à l'air en absorbent l'oxygène, et il se dégage de l'acide carbonique. L'huile se concrétionne, s'épaissit et quelquefois durcit. Quand une huile s'épaissit assez pour ne plus tacher le papier sur lequel on l'applique, on l'appelle huile siccative; celle qui ne s'épaissit pas assez pour ne pas tacher le papier est dite non siccative :

HUILES SICCATIVES.	HUILES NON SICCATIVES.
Huile de lin.	Huile de colza.
— d'œillette.	— d'olive.
— de chènevis.	— d'amandes douces.
— de faîne.	— de noisettes.
— de noix.	— de ricin.

Comme caractère distinctif, l'acide hypoazotique solidifie toutes les huiles non siccatives.

Par le froid les huiles grasses se séparent en deux corps gras, l'un liquide, l'autre solide, que l'on peut séparer par compression dans du papier buvard. (Nous avons vu cette réaction dans la préparation de la margarine.)

Les huiles servent à la nourriture, à la fabrication des savons, à l'éclairage, au graissage, à la peinture.

Nous avons vu qu'on pouvait les emprunter à deux sources : 1° à des graines végétales (colza, lin, etc.), nous en avons expliqué sommairement la préparation; 2° à la pulpe de fruits charnus, tels que l'olive; les huiles sont broyées sous la meule d'un moulin, et la pâte comprimée sous un pressoir donne l'huile vierge. Les tourteaux sont ensuite comprimés à chaud, et donnent de l'huile de qualité inférieure.

L'huile d'olive sert à la nourriture, à la fabrication du savon, à adoucir les mouvements des rouages d'horlogerie; elle est presque toujours falsifiée au moyen d'huiles d'œillette et de faîne : on reconnaît la fraude au moyen de l'acide hypoazotique, qui solidifie seulement l'huile d'olive.

Les huiles de navette et de colza ne sont pas siccatives; elles servent à l'éclairage, à la fabrication des savons verts, au foulage des draps et à la préparation des cuirs.

L'huile d'œillette ou de pavot est siccative, d'une saveur douce analogue à celle de la noisette, couleur pâle.

L'huile de lin est siccative, jaune clair, d'odeur forte et de saveur peu agréable. Elle rancit très-vite; on l'emploie pour préparer les vernis gras, les peintures à l'huile, l'encre d'imprimerie, etc.

L'huile de chènevis, analogue à la précédente, siccative, s'emploie en peinture et dans la fabrication des savons noirs.

Fig. 336.

Huiles essentielles. — Les huiles essentielles sont âcres et caustiques. On les divise en deux classes : 1° celles qui renferment de l'oxygène, du carbone et de l'hydrogène; 2° celles qui ne sont que des carbures d'hydrogène.

Les huiles essentielles se rencontrent dans les végétaux; on les en retire par distillation en faisant bouillir les produits végétaux avec de l'eau; si l'huile est

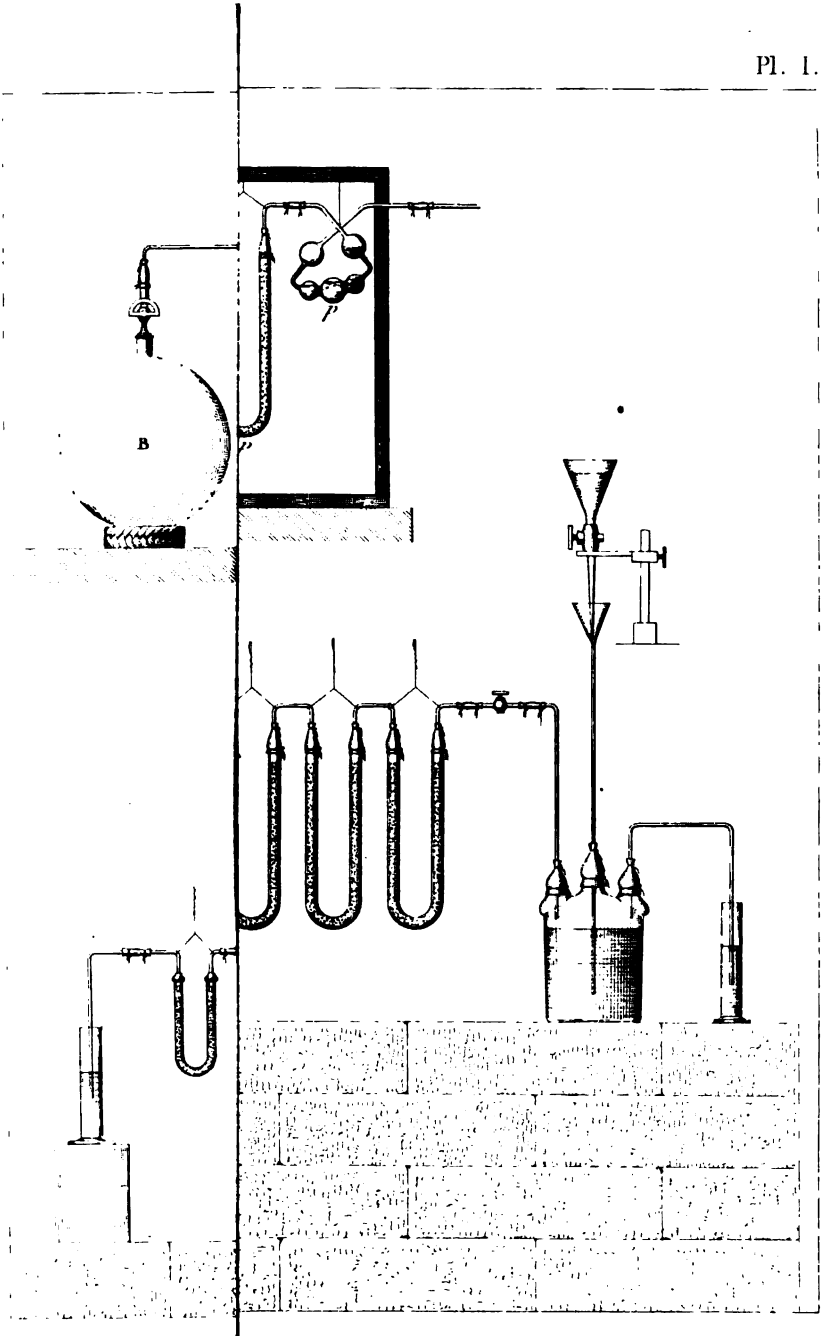
plus lourde que l'eau, ce qui est rare, on reçoit le liquide qui sort de l'alambic dans un flacon ordinaire et l'huile reste au fond; si l'huile est plus légère que l'eau, on amène le courant liquide qui sort du serpentin au fond du récipient florentin (sorte de carafe à la base de laquelle est adapté un siphon). L'huile essentielle s'accumule à la surface et déplace peu à peu l'eau, qui s'écoule par le siphon (*fig.* 337).

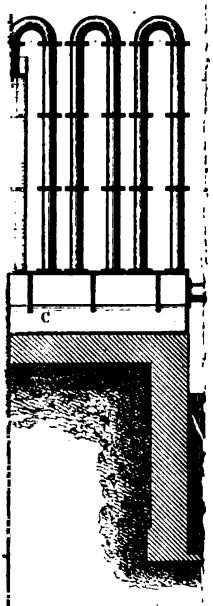
Principales essences. — 1° *Essence de térébenthine.* ($C^{20}H^{16}$). — Elle s'obtient par la distillation de la térébenthine, liquide visqueux qui s'écoule des fentes faites dans l'écorce des pins. Elle est incolore, d'une odeur forte et désagréable, très-volatile; elle sert à préparer les vernis.

2° *Essence de citron.* — S'obtient en comprimant la peau râpée des citrons. Elle enlève les taches grasses sur les étoffes.

3° Les *essences de roses, de bergamote, de fleur d'oranger, de jasmin,* etc. — S'obtiennent par distillation avec l'eau des pétales de rose, de l'écorce de bergamote, des fleurs d'oranger, jasmin, etc., et on recueille le liquide dans le récipient florentin.

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.


B


c

MANUEL

DE L'INGÉNIEUR

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES AU GRADE D'INGÉNIEUR

PAR

A. DEBAUVE

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

3me FASCICULE

AVEC 46 FIGURES ET 3 PLANCHES.

Géologie et minéralogie

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR

SUCCESSEUR DE VICTOR DALMONT

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

Quai des Augustins, 49

1872

Droits de traduction et de reproduction réservés

GÉOLOGIE ET MINÉRALOGIE

PROGRAMME DES MATIÈRES

1. Objet de la géologie. — Ses applications aux travaux publics. — Définition des mots : minéral, roche, couche, terrain, formation.

2. Terrains. — Division des terrains stratifiés et terrains non stratifiés. — Terrains métamorphiques — Terrains de transport. — Terrains volcaniques. — Soulèvements. — Chaînes de montagnes.— Vallées.—Principes sur lesquels est fondée la division des terrains stratifiés : superposition et concordance des couches ; débris organiques. — Description sommaire des terrains ; leur distribution sur le sol de la France; leur aspect général, leurs étages principaux. — Terrains de diluvium et d'alluvion.— Modifications actuelles des rivages et des cours d'eau. — Dunes, plages, barres, deltas. — Cartes géologiques; coupes.

3. Minéraux. — Compositions et caractères des minéraux qui constituent les roches principales : chaux carbonatée, dolomie, chaux sulfatée. — Quartz, feldspath, mica, talc, amphibole, pyroxène, argile. — Combustibles minéraux : anthracite, houille, lignite, tourbe.

4. Roches. — Composition et caractères des roches principales : granites, gneiss, schistes, porphyres, trachytes, basaltes, laves. — Calcaires, dolomies, brèches, poudingues, conglomérats, argiles, marnes sables. — Modes divers de formation des roches.

GÉOLOGIE ET MINÉRALOGIE

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I.

Objet de la géologie. 1
Son application aux travaux publics. . 1
Définition des mots : minéral, roche, couche, terrain, formation. 2

CHAPITRE II.

Terrains.

Terrains stratifiés et non stratifiés. . . 3
— métamorphiques. 4
— de transport. 4
— volcaniques. 5
Volcans actuels. 5
Soulèvements, montagnes. 12
Systèmes de montagnes. 13
Réseau pentagonal. 16
Vallées. 18
Division des terrains stratifiés. 18
Fossiles. 19

TERRAINS DE TRANSITION OU PALÉOZOÏQUES.

Terrain silurien. 20
— devonien. 21
— carbonifère. 22
— permien. 24

TERRAINS SECONDAIRES.

Terrain triasique. 25
— jurassique. 27
— crétacé. 32

TERRAINS TERTIAIRES.

Terrain éocène. 34
— miocène. 36
— pliocène. 37
Description géologique de la France. . 38
Terrains quaternaires. 41
Déluges de l'Europe. 41
Période glaciaire. 42
Déluge asiatique. 43
Fossiles du terrain quaternaire. 43
De l'homme fossile. 44
Tableaux géologiques. 44
Tableau des matériaux de construction. . 47
Tableau des minerais utiles. 48
Alluvions. 49
Barres, deltas, plages. 50
Dunes. 51
Fixation des dunes. 57
Cartes géologiques, coupes. 59

CHAPITRE III.

Minéraux.

Caractères extérieurs des minéraux. . . 61
— cristallographiques. 62
Systèmes cristallins. 63
Caractères physiques et chimiques. . . 66
Chaux carbonatée. 66
Dolomie. 68
Chaux sulfatée. 69
Quartz. 70
Feldspath. 72
Mica. 75
Talc. 76
Amphibole. 77
Pyroxène. 78
Quelques minéraux usuels. 80

COMBUSTIBLES MINÉRAUX.

Anthracite. 81
Houilles. 82
Caractères physiques de la houille. . . . 83
Formation des houilles. 84
Composition chimique des houilles. . . 88
Houilles pyriteuses. 89
Modifications des houilles à l'air. . . . 89
Classification des houilles. 92
Lignites : leur formation. 93
Composition des lignites. 94
Tourbe. 95
Composition de la tourbe. 96
Houilles agglomérées. 97
Coke. 97

CHAPITRE IV.

Roches.

Granite et ses variétés. 99
Gneiss. 100
Ardoises. 101
Porphyres. 102
Trachytes. 103
Basaltes. 104
Laves. 105
Calcaires, dolomies. 106
Roches arénacées. 106
Argiles et marnes. 109
Modes divers de formation des roches. . 111

GÉOLOGIE ET MINÉRALOGIE

CHAPITRE PREMIER

OBJET DE LA GÉOLOGIE

Ses applications aux travaux publics. — Définition des mots : minéral, roche, couche, terrains, formation.

La géologie est l'étude de la terre. Elle s'occupe de la physionomie générale extérieure de notre globe, de la configuration des montagnes et des vallées; mais cette première partie de la géologie est moins intéressante que la seconde, qui a pour but l'étude de la compósition intérieure du globe terrestre; elle s'occupe de la constitution chimique et physique des matières qu'on y rencontre, de la place qu'elles ont les unes par rapport aux autres, de leur âge relatif et de la manière dont elles ont pris naissance.

Ce n'est point tout ; on rencontre dans les diverses couches du globe des débris de végétaux et d'animaux, aujourd'hui disparus ou transformés; la géologie les reconstitue, les fait revivre, les classe et montre leurs rapports avec les animaux et les végétaux que nous connaissons.

La terre, comme tout ce qui existe, se modifie sans cesse; des montagnes s'élèvent, des volcans s'allument, des torrents se creusent un lit, des courants marins d'une puissance énorme changent de direction, des glaciers se meuvent entraînant une grande masse de matières solides. Voilà des phénomènes que le géologue ne peut laisser de côté, car, outre qu'ils présentent par eux-mêmes un grand intérêt, ils servent à expliquer les modifications anciennes.

La géologie a donc des liaisons nombreuses avec la géographie ou description de la surface du globe, avec la physique et la chimie qui étudient les phénomènes produits au contact des corps, ainsi que les propriétés internes et externes de ces corps, avec la météorologie et l'hydrographie, avec la mécanique, avec les sciences naturelles qui s'occupent de l'étude des animaux et des végétaux.

Application de la géologie aux travaux publics. — La définition précédente fait pressentir tout l'intérêt qu'offre la géologie à l'ingénieur chargé de travaux publics.

Il est important de connaître, par exemple, la nature d'un terrain dans lequel on ouvre une tranchée ; nous avons vu que l'on n'a pu, malgré de grands efforts,

consolider le talus de certaines tranchées ouvertes dans l'argile; c'est ainsi que sur la ligne de Paris à Orléans, on a abandonné la tranchée d'Ablons et qu'on a dévié le chemin de manière à suivre les bords de la Seine au lieu de couper le coteau.

Lorsque l'on prépare un projet de tunnel, la connaissance géologique des couches que l'on a à traverser permet d'apprécier la plus ou moins grande difficulté qu'on rencontrera dans le travail, de savoir si l'on pourra déblayer sans crainte une grande section à la fois, ou si l'on sera forcé de recourir à des travaux de consolidation coûteux. Suivant le terrain traversé, il faudra former les parois du tunnel d'une voûte très-épaisse ou très-mince; dans certains cas bien rares, on gardera comme parois le rocher lui-même.

La connaissance des couches à traverser pour forer un puits est, on le conçoit, d'une importance capitale.

Dans un autre ordre d'idées, en ce qui touche les matériaux de construction, la géologie est fort utile à connaître. D'après la constitution d'un pays, on sait si l'on a quelque chance d'y rencontrer de bonnes pierres, résistantes et inaltérables, ou encore des chaux hydrauliques et du plâtre.

Définitions des mots : minéral, roche, couche, terrains, formation. — On appelle minéral toute substance, que l'on rencontre dans la nature, formant un composé chimique bien défini et non un mélange. Le marbre blanc (carbonate de chaux pur), le plâtre pur (sulfate de chaux), le cristal de roche ou quartz (silice), les minerais purs (pyrites, galène, etc....), le kaolin (argile pur ou silicate d'alumine), sont des minéraux.

Quelquefois, les minéraux se rencontrent en assez grandes masses pour former des roches; mais les roches sont le plus souvent un mélange de minéraux. Ainsi le granite est formé du mélange de trois minéraux : quartz, feldspath et mica

Le minéral est l'individu ; la roche est la réunion d'individus de la même famille ou de familles différentes, de sorte que l'on distingue les roches simples et les roches composées.

Certaines roches, dites sédimentaires, dont nous parlerons plus loin, se présentent en masses à faces parallèles d'épaisseur plus ou moins forte, que l'on appelle couches.

Un terrain est une série de roches, qui présentent des caractères communs et que l'on trouve toujours réunies les unes aux autres ; ces roches forment donc un ensemble particulier, un véritable individu, auquel on donne le nom de terrain.

Les terrains, à leur tour, se classent en formations; la formation est l'ensemble des terrains qui se rattachent les uns aux autres par quelques caractères communs, et, surtout par ce fait, qu'ils ont pris naissance pendant la même période. Chaque formation correspond de la sorte à une période, pendant laquelle le globe terrestre s'est montré sous un aspect particulier.

CHAPITRE II

TERRAINS

Division des terrains en terrains stratifiés et terrains non stratifiés. — Terrains métamorphiques. — Terrains de transport. — Terrains volcaniques. — Soulèvements. — Chaînes de montagnes. Vallées.

Divisions des terrains en terrains stratifiés et terrains non stratifiés. — Les terrains se présentent sous deux formes très-différentes qui correspondent à deux modes de formation distincts.

Les uns sont formés de couches continues plus ou moins étendues et limitées par des faces parallèles ; d'où leur vient le nom de terrains stratifiés, c'est-à-dire formés de lits successifs. Les surfaces parallèles qui limitent les couches sont plus ou moins ondulées ; ces terrains ont été formés par des substances qui se

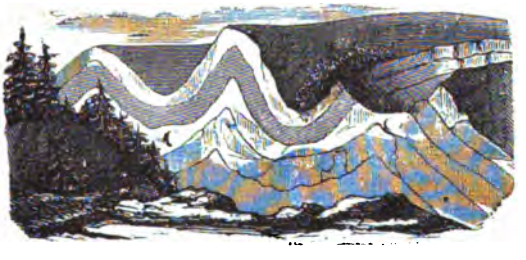


Fig. 1.

sont déposées au milieu des eaux, comme la vase d'une eau trouble se dépose au fond d'un bassin ; c'est de là que vient le nom de terrains sédimentaires, par lequel on désigne souvent les terrains stratifiés.

On dit encore que les terrains stratifiés sont d'origine neptunienne (de Neptune, dieu de la mer).

Les couches formées au milieu des eaux ont ensuite été soulevées ou abaissées, quelquefois même brisées par le mouvement de l'écorce terrestre.

La figure 1 montre bien comment les diverses couches d'un terrain stratifié se présentent dans la nature.

La seconde classe de terrains affecte une grande irrégularité de formes ; ils sont composés de masses plus ou moins considérables, formant, tantôt des montagnes, tantôt des blocs enclavés au milieu de terrains stratifiés comme le montre la figure 2. Les roches que l'on rencontre dans ces terrains sont généralement cristallines. Elles ont été formées par la solidification plus ou moins lente de masses, autrefois en fusion.

On les appelle roches non stratifiées, roches cristallines ou d'origine plutonienne (de Pluton, dieu du feu).

C'est dans ces terrains cristallisés qu'il faut ranger les filons métalliques tels

Fig. 2.

que (*a*) et (*b*), figure 2, qui semblent dus à la solidification de liquides poussés énergiquement de l'intérieur du globe à la surface.

Les roches cristallines forment les plus hautes montagnes de la terre; elles semblent être sorties de dessous les terrains stratifiés et en avoir percé toutes les couches; elles constituent, pour ainsi dire, les fondements de l'écorce terrestre.

Elles se distinguent par leurs arêtes vives et déchiquetées.

Dans les roches cristallines, on ne trouve point de débris animaux ou végétaux; ce n'est que dans les terrains stratifiés que ces débris apparaissent; l'appation de la vie sur la terre a dû concorder avec la formation des mers et, par suite, avec la formation des premières couches de sédiment.

Terrains métamorphiques. — Nous venons de voir que les roches pouvaient avoir deux origines distinctes: neptunienne ou plutonienne, suivant qu'elles s'étaient déposées au milieu des eaux, ou qu'elles s'étaient formées par la solidification de masses liquides.

Or des masses minérales ne peuvent être liquides qu'à la faveur de températures, pour ainsi dire, inconnues à l'homme; donc, ces masses incandescentes lorsqu'elles ont jailli au travers des terrains stratifiés ont échauffé ceux-ci et, par suite, ont produit dans leur constitution physique et chimique de profondes modifications.

Les couches soumises à cette influence conservent la forme des terrains stratifiés avec tous leurs fossiles et, cependant, elles se rapprochent des terrains non stratifiés par leur constitution interne.

Ces roches sont dites métamorphiques. On les observe au voisinage des roches éruptives, c'est-à-dire sur les flancs des montagnes; elles existent dans tous les terrains de sédiment et surtout dans les terrains les plus anciens.

C'est par le métamorphisme que certains calcaires sont devenus complètement cristallins; ils offrent une cassure analogue à celle du sucre; aussi les appelle-t-on calcaires saccharoïdes. Ils sont à gros grains comme le marbre de Paros, ou à petits grains comme le marbre de Carrare près de Gênes.

Terrains de transport. — Il n'est point de roche qui résiste à l'action prolongée des eaux; la plus dure est entamée avec le temps, et les fragments en sont entraînés par les cours d'eau, auxquels la pluie donne naissance. De nos jours, il existe des torrents qui transportent des masses énormes de matières; mais supposez un cataclysme qui déplace les mers, vous pourrez vous figurer quelle a été à certaines époques la violence des courants liquides à la surface du sol. Les roches désagrégées et broyées furent entraînées, et leurs fragments pulvérulents vinrent se déposer par couches horizontales dans des eaux tranquilles. A cette poussière, se trouvent souvent mélangés des fragments plus gros et plus

résistants, dont les angles se sont émoussés et qui se sont transformés en galets ou cailloux roulés.

Au lieu de courants aquatiques, il s'est produit dans certains cas des courants liquides formés par les roches en fusion, qui s'épanchaient de l'intérieur de la terre. Rencontrant des roches friables ou désagrégées, ces courants ont pu dans certains cas en enlever des fragments et former une classe particulière de terrains de transport.

Nous reviendrons sur ce qui précède, lorsque nous parlerons des roches arénacées.

Un autre mode de formation des terrains de transport, nous est offert par les glaciers dont nous dirons plus loin quelques mots.

Terrains volcaniques. — Volcans actuels. — Il faut considérer la terre comme une masse primitivement liquide, qui peu à peu par le refroidissement s'est enveloppée d'une écorce solide. Cette écorce, à l'origine, a dû être bien faible, et soit contraction causée par le refroidissement, soit pression considérable exercée par les marées de la masse liquide intérieure, elle s'est fissurée en plus d'un point. Les fissures ont livré passage aux liquides et aux gaz de l'intérieur, et il s'est formé ce que l'on appelle des éruptions volcaniques. Autrefois ces éruptions ont pris des proportions considérables, et les masses liquides produites de la sorte en se solidifiant sont devenues nos chaînes de montagnes. A l'époque actuelle, la force volcanique se manifeste en quelques points isolés du globe, par des conduits qui, de l'intérieur de la terre viennent déboucher à la surface, et qui, d'une manière généralement intermittente, donnent passage tantôt à des laves liquides, tantôt à des vapeurs et à des gaz.

Dans les masses volcaniques, on distingue trois grandes formations : 1° Formation trachytique, 2° formation basaltique, 3° formation lavique.

Les trachytes ont apparu vers le milieu de la période tertiaire et se sont produits jusqu'à la fin de cette période. Ils ont formé en France les groupes du Mont-Dore, la chaîne du Velay et le Cantal.

Le basalte s'est montré pendant la période secondaire et tertiaire. En France, on le trouve particulièrement dans le Vivarais.

En minéralogie nous décrirons les propriétés des trachytes et des basaltes.

La formation lavique s'est produite pendant la période actuelle ; elle renferme cependant beaucoup de volcans éteints dont la tradition n'a recueilli aucune éruption. Tels sont les cinquante pics volcaniques qui forment le massif de l'Auvergne, et qui sous le nom de la chaîne des Puys domine la ville de Clermont-Ferrand.

Parmi les trois cents volcans actuellement en activité, il faut distinguer : 1° les volcans isolés, ou cônes gigantesques percés dans leur axe d'une cheminée par où s'échappent les laves, les vapeurs et les gaz ; sur les flancs du cône d'éruption se produisent quelquefois de petits cônes secondaires ou adventifs, percés aussi d'une cheminée qui communique toujours avec la cheminée principale ; 2° les volcans réunis en séries, leurs sommets se trouvent sur une ligne droite, et ils indiquent une longue fente de l'écorce terrestre, tandis que les premiers correspondent à un orifice sensiblement circulaire. Les principaux volcans en série sont : ceux des îles de la Sonde, des Moluques, du Chili, des Antilles et du Mexique ; parmi les volcans isolés nous signalerons le Stromboli, l'Etna, le Vésuve et le mont Ararat.

Voici la forme d'un volcan : le sommet du cône, dit cône d'éjection formé par les laves, est brisé et remplacé par un entonnoir qu'on appelle cratère ; au centre

du cratère, se trouve l'orifice d'éjection, autour duquel se forme comme un bourrelet, un cône de petites dimensions. Quelquefois, mais rarement, le cratère n'existe pas, et l'orifice se trouve au sommet du cône principal.

Nous empruntons à M. Figuier la description des circonstances d'une éruption volcanique :

« L'éruption d'un volcan est ordinairement annoncée par un bruit souterrain, accompagné de secousses, d'ébranlements du sol, et quelquefois de véritables tremblements de terre. Le bruit, qui provient d'une très-grande profondeur, se fait entendre sur une large étendue de pays, comme s'il partait du voisinage. Il ressemble à un feu bien nourri d'artillerie ou de mousqueterie. Quelquefois, c'est comme le roulement sourd d'un tonnerre souterrain. Des crevasses se produisent souvent aux époques des éruptions sur un rayon considérable. La figure 3 représente la disposition d'une de ces crevasses du sol.

L'éruption commence par une forte secousse qui ébranle l'intérieur de la mon-

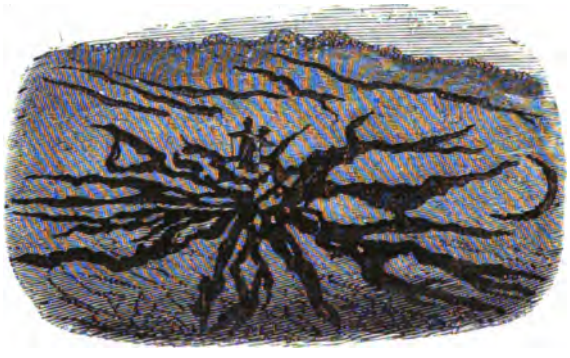


Fig. 3.

agne. L'ascension des masses fluides et des vapeurs chaudes se révèle, dans certains cas, par la fonte des neiges sur les flancs du cône d'éjection. En même temps que se produit la secousse qui triomphe des dernières résistances de la croûte solide du sol, il s'échappe du fond du cratère une masse considérable de gaz, et particulièrement de vapeurs d'eau.

Les vapeurs d'eau, il importe de le remarquer, sont la cause essentielle des terribles effets mécaniques dont s'accompagnent les éruptions des volcans actuels. Les éruptions de matières granitique, porphyrique, trachytique, et quelquefois même basaltique, sont arrivées au sol sans provoquer ces violentes explosions, ces formidables éjections de roches et de pierres qui accompagnent les éruptions des volcans modernes. Les granits, les porphyres, les trachytes et les basaltes se sont épanchés sans violence à l'extérieur, parce que la vapeur d'eau n'accompagnait pas ces roches liquéfiées, et telle est la circonstance qui explique la tranquillité des épanchements anciens, comparée à la violence et aux terribles effets des éruptions des volcans actuels. Bien établi par les investigations de la science, ce fait nous donne l'explication des puissants effets mécaniques des volcans modernes, qui contrastent avec les tranquilles éruptions des âges primitifs.

Dans les premiers moments d'une éruption volcanique, les masses de pierres et de cendres qui comblaient le cratère sont projetées en l'air par l'action, brusquement développée, de l'élasticité de la vapeur. Cette vapeur se dégage au

travers des laves rouges de feu, sous la forme de grandes bulles arrondies, qui tournoient dans l'air au-dessus du cratère et s'étendent en couronnes d'autant plus larges qu'elles s'élèvent plus haut. Ces masses de vapeurs finissent par former des nuages pelotonnés d'une éblouissante blancheur, qui suivent la direction du vent. Pline le jeune compare à la cime étagée d'un sapin les nuages que forme au sein des airs la vapeur d'eau provenant d'une éruption volcanique.

Ces nuages volcaniques sont gris ou noirs, selon que la quantité de *cendres* (c'est-à-dire de matière pulvérulente qu'ils emportent mélangée à la vapeur d'eau) est plus ou moins considérable. Dans quelques éruptions, on a remarqué que ces nuages, en s'abaissant jusqu'au sol, répandaient une odeur particulière d'acide chlorhydrique ou sulfureux; on a même trouvé ces deux acides mélangés à l'eau des pluies provenant de la résolution de ces nuages.

Les nuages pelotonnés de vapeurs qui partent des volcans sont sillonnés d'éclairs continus suivis de violents coups de tonnerre ; en se condensant, ils forment de désastreuses averses qui tombent sur les flancs de la montagne. Beaucoup d'éruptions, connues sous le nom de *volcans de boue* ou de *volcans d'eau*, ne sont autre chose que ces mêmes pluies entraînant avec elles et laissant tomber sur le sol des cendres, des pierres et des scories.

Passons aux phénomènes dont le cratère est le théâtre pendant l'éruption même. On y constate d'abord un mouvement incessant d'ascension et d'abaissement de la lave fluide qui remplit l'intérieur du cratère. Ce double mouvement est souvent interrompu par de violentes explosions de gaz. Le cratère de Kiranéa, dans l'île de Hawaï (Sandwich), contient un lac de matière fondue large de 500 mètres. Ce lac subit ce double mouvement d'élévation et d'abaissement. Chacune des bulles de vapeur qui sort du cratère pousse vers le haut la lave fondue; elle s'élève et éclate à la surface avec une force considérable. Une partie de la lave, à demi refroidie et scorifiée, est ainsi projetée vers le haut, et les divers fragments sont lancés avec violence dans toutes les directions, comme ceux d'une bombe qui éclate. Le plus grand nombre des fragments lancés verticalement dans les airs retombe dans le cratère. Beaucoup s'accumulent sur le bord de l'ouverture et ajoutent de plus en plus à la hauteur du cône d'éruption. Les fragments plus légers et de petites dimensions, comme aussi les cendres fines, sont entraînés par les spirales de vapeur et portés sur des étendues de pays souvent très-considérables. En 1794, les cendres du Vésuve furent lancées jusqu'au fond de la Calabre ; en 1812, celles du volcan de Saint-Vincent, dans les Antilles, furent portées à l'est jusqu'à la Barbade, et y répandirent une telle obscurité, qu'en plein jour on ne voyait pas à se conduire. Enfin, quelques masses de laves, puissantes et isolées, sont projetées en dehors de la gerbe de scories, elles sont arrondies par suite de leur mouvement de tournoiement dans l'air, et portent le nom de *bombes volcaniques*.

Nous avons déjà fait remarquer que la lave qui, à l'état liquide, remplit le cratère et la cheminée intérieure du volcan, a été poussée en haut par les vapeurs d'eau. Dans beaucoup de cas, la force mécanique de cette vapeur est si considérable, qu'elle lance la lave par-dessus les bords du cratère, et qu'il se forme ainsi un torrent de feu qui se répand le long de la montagne. Ce débordement n'a lieu au sommet de la montagne que dans les volcans d'une faible hauteur ; dans les volcans élevés, la montagne se fend d'ordinaire près de sa base, et c'est par cette fente que le torrent de lave s'épanche sur le pays environnant.

L'écoulement de la lave donne lieu à des phénomènes qui sont très-différents,

selon le degré de fluidité de la lave, selon sa température et le degré d'inclinaison de la montagne.

Une fois épanchée, la lave se refroidit assez vite; elle durcit et présente une croûte écaillée par suite du refroidissement; par ses interstices, on voit encore s'échapper des jets de vapeur d'eau. Mais, sous cette croûte superficielle, la lave continue d'être liquide; elle ne se refroidit que peu à l'intérieur de sa masse. Elle chemine avec une extrême lenteur, entravée qu'elle est dans sa progression par les débris des roches qui s'entassent au-devant de cette rivière brûlante et sont charriées par son cours.

La vitesse avec laquelle se meut un courant de lave dépend de son degré de fluidité, de sa masse et de la pente du sol. On a constaté que certains courants de lave parcouraient en une heure plus de 1,000 mètres; mais leur vitesse est d'ordinaire beaucoup moindre; un homme à pied peut souvent la dépasser. Ces courants varient beaucoup en dimensions. Le courant le plus considérable de la lave de l'Etna a, sur quelques points, une épaisseur de 35 mètres et une largeur d'un mille et demi géographique. La plus grande masse lavique qui ait été épanchée dans les temps historiques est celle du Skaptor Jokul, en Islande, en 1783. Elle forma deux courants dont les extrémités étaient éloignées l'une de l'autre de 20 lieues, et qui, de distance en distance, présentaient une largeur de 3 lieues et une épaisseur de 200 mètres.

Un effet tout particulier et qui ne fait que simuler l'activité volcanique s'observe dans les localités où existent des *volcans de boue*. La plupart de ces volcans présentent de petites éminences coniques, avec une dépression dans leur intérieur. Ils versent au dehors de la boue poussée par des gaz et de la vapeur d'eau. La température des matières lancées au dehors est d'ordinaire peu élevée. La boue, généralement grisâtre, à odeur de pétrole, est soumise aux mêmes mouvements alternatifs que la lave fondue dans les volcans proprement dits. Les gaz qui projettent à l'extérieur cette argile fluide, mélangée de sels, de gypse, de naphte, de soufre, quelquefois même d'ammoniaque, sont habituellement l'hydrogène carboné et l'acide carbonique. Tout porte à croire qu'ils proviennent, au moins en grande partie, des réactions qui s'effectuent entre les divers éléments du sous-sol sous l'influence de l'eau qui s'y infiltre, entre des marnes bitumineuses, des carbonates complexes et probablement l'acide carbonique de sources acidules. M. Fournet a vu en Languedoc, près de Roujan, des ébauches de ces sortes de formations; et d'ailleurs non loin de là existe la source bitumineuse de Gabian.

Les volcans de boue, ou *salses*, se présentent en un assez grand nombre de lieux à la surface de la terre. Il en existe beaucoup dans les environs de Modène; on en voit en Sicile, entre Arragona et Girgenti. Pallas en a observé en Crimée, dans la presqu'île de Kertch, à l'île de Taman: de Humboldt en a décrit et figuré dans la province de Carthagène, dans l'Amérique méridionale; on en cite enfin à l'île de la Trinité et dans l'Indoustan.

On trouve, dans certaines contrées, des buttes formées de matières argileuses résultant des anciennes déjections d'un volcan de boue, duquel tout dégagement de gaz, d'eau et de terre a depuis longtemps cessé. Quelquefois, ce phénomène reprend avec violence son cours interrompu. De légers tremblements de terre s'y font alors sentir, et des blocs de terre desséchée étant projetés au loin, de nouveaux flots de boue se font jour.

Revenons aux volcans ordinaires, c'est-à-dire à ceux qui lancent des laves.

A la fin d'une éruption lavique, quand l'activité du volcan commence à s'af-

faiblir, l'émission du cratère est réduite à des dégagements plus ou moins abondants de gaz, qui s'échappent par une multitude de fissures du sol, mêlés à de la vapeur d'eau.

Le plus grand nombre de volcans qui se sont ainsi éteints forment ce qu'on appelle les *solfatares*. L'hydrogène sulfuré qui se dégage des fissures du sol se décompose au contact de l'air, en formant de l'eau par l'action de l'oxygène atmosphérique, et laissant du soufre, qui se dépose ainsi en masses considérables sur les parois du cratère et dans les fentes du sol. Telle est l'origine géologique du soufre que l'on recueille à Pouzzole, près de Naples.

Le soufre joue dans l'industrie un rôle fondamental. C'est, en effet, avec le soufre extrait des terres qui environnent les bouches des volcans éteints, c'est-à-dire avec les produits des *solfatares*, que l'on prépare l'acide sulfurique, agent fondamental d'une foule d'industries dans les deux mondes, et qui est devenu un des plus puissants éléments de notre production manufacturière.

Les sources d'eau bouillante connues sous le nom de *geysers* sont une autre émanation minérale qui se rattache aux anciens cratères. Elles sont continues ou intermittentes. On trouve en Islande un grand nombre de ces sources jaillissantes. L'un des *geysers* de l'Islande projette une colonne d'eau de 6 mètres de diamètre, s'élevant parfois à 50 mètres de hauteur. L'eau, en se refroidissant, laisse déposer la silice qu'elle tenait en dissolution.

La phase dernière de l'activité volcanique, c'est un dégagement d'acide carbonique sans élévation de température. Dans les lieux où se manifestent ces émanations continues de gaz acide carbonique, on reconnaît l'existence d'anciens volcans dont ces dégagements sont le phénomène terminal. C'est ce que l'on observe de la façon la plus remarquable en Auvergne, où existent une multitude de sources acidules, c'est-à-dire chargées d'acide carbonique. Pendant qu'il créait les mines de Pont-Gibaud, M. Fournet eut à lutter contre ces émanations qui, parfois, s'effectuaient avec une puissance explosive. Des jets d'eau s'élançaient à de grandes distances dans les galeries, en ronflant comme la vapeur qui s'échappe de la chaudière d'une locomotive. Le liquide qui remplissait un puits abandonné de l'exploitation fut, à deux reprises, soulevé par de violentes effervescences. Elles vidèrent à moitié cette excavation, et les torrents du gaz se répandant dans la vallée asphyxièrent un cheval et un troupeau d'oies. Les mineurs étaient obligés de s'enfuir en toute hâte au moment des éructations gazeuses, et ils devaient se tenir droits, afin de ne pas plonger la tête dans l'acide carbonique que sa pesanteur maintient vers le bas des galeries. Il y a loin de là au petit effet de la *grotte du chien*, qui, près de Naples, excite la surprise des badauds et qui se propage dans tous nos livres, comme si la France n'avait pas aussi ses *merveilles de la nature*. Le même fait se manifeste avec une intensité bien supérieure à Java, dans la vallée dite du *Poison*, qui est pour les habitants un véritable objet de terreur. Dans cette vallée redoutable, le sol est partout couvert de squelettes et de carcasses de tigres, de chevreuils, de cerfs, d'oiseaux, et même d'ossements humains, car l'asphyxie frappe tout être vivant qui s'aventure dans ces lieux désolés.

Les volcans actuellement en activité sont, comme nous l'avons dit, très-nombreux et répandus sur toute la surface du globe.

Les plus connus sont ceux du Vésuve, près de Naples, de l'Etna, en Sicile, et de Stromboli, dans les îles Lipari. Donnons quelques rapides indications sur chacun de ces volcans actuels.

Le Vésuve est de tous les volcans celui qui a été le mieux étudié : c'est le

volcan pour ainsi dire classique. Personne n'ignore qu'il s'ouvrit pour la première fois l'an 79 après Jésus-Christ. Cette éruption célèbre coûta la vie au naturaliste Pline, qui sacrifia son existence à l'observation du plus important phénomène de la nature. Après bien des mutations, le cratère actuel du Vésuve consiste en un cône entouré, du côté opposé à la mer, par une crête en demi-cercle, composée de matières ponceuses ou amphigéniques étrangères au Vésuve proprement dit.

On croit que le mont Vésuve était primitivement la montagne à laquelle on donne aujourd'hui le nom de *Somma*. Le cône, qui seul porte aujourd'hui le nom de Vésuve, s'est probablement formé lors de la fameuse éruption de l'an 79, qui ensevelit sous des avalanches de débris de ponce pulvérulente les villes d'Herculanum et de Pompéi. Ce cône se termine par un cratère dont la forme a changé bien des fois, et qui a vomi, depuis l'origine, des déjections de nature variée et des courants de lave. Les éruptions du Vésuve ne sont séparées, de nos jours, que par des intervalles de quelques années.

Les îles Lipari renferment le volcan de Stromboli, continuellement en ignition, et qui forme ce fameux phare naturel de la mer Tyrrhénienne, tel qu'Homère l'a observé, tel qu'on l'avait vu avant le vieil Homère et tel qu'on le voit encore de nos jours. Ses éruptions sont continues. Le cratère d'où elles s'élancent ne se trouve pas à la pointe de l'éminence conique de l'île, mais sur un de ses côtés, à peu près aux deux tiers de la hauteur. Il est en partie rempli de lave fondue, qui s'y trouve continuellement soumise à un mouvement alternatif d'ascension et d'abaissement. Ce mouvement est provoqué par la montée de bulles de vapeur qui s'élèvent à la surface et projettent au dehors une haute colonne de cendres. Pendant la nuit, ces nuages de vapeur resplendissent d'une magnifique réverbération rouge, qui éclaire d'une sinistre lueur l'île et la mer environnante.

Situé sur la côte orientale de la Sicile, l'Etna paraît, au premier coup d'œil, avoir une structure beaucoup plus simple que celle du Vésuve. Ses pentes sont moins rapides, plus uniformes de tous côtés; sa base représente à peu près la forme d'un bouclier. La partie inférieure de l'Etna, ou la région cultivée de cette montagne est inclinée d'environ 3°. La région moyenne, ou celle des forêts, est plus rapide; elle mesure 8° d'inclinaison. La montagne se termine par un cône de forme elliptique, de 32° d'inclinaison, qui porte en son milieu, au-dessus d'une terrasse presque horizontale, le cône d'éruption, avec son cratère arrondi. Ce cratère a 3300 mètres d'altitude. Il ne donne point issue à des laves, mais seulement à des gaz. Les laves sortent par soixante cônes plus petits qui se sont formés sur les pentes du volcan. On peut, en regardant la montagne du sommet, se convaincre que ces cônes sont disposés en rayons et placés sur des fentes qui convergent vers le cratère comme vers un centre.

Ajoutons pour compléter cette très-rapide esquisse des phénomènes volcaniques actuels, qu'il existe des volcans sous-marins. Si l'on n'en connaît qu'un petit nombre, cela tient à ce que leur apparition au sein des eaux est presque constamment suivie d'une disparition plus ou moins complète. Toutefois, des phénomènes très-puissants et très-visibles nous donnent une démonstration suffisante de la persistance continuelle des actions volcaniques au-dessous du bassin des mers. Au milieu des eaux de l'Océan, on voit quelquefois apparaître subitement des îles sur des points où les navigateurs n'en avaient jamais aperçu. C'est ainsi que l'on a vu de nos jours se former l'île Julia. Apparue au sud-ouest de la Sicile en 1831, elle s'abîma deux mois après sous les vagues. A diverses époques, et notamment en 1811, il se forma des îles nouvelles dans les Açores.

Il s'en éleva à plusieurs reprises autour de l'Islande et sur beaucoup d'autres points.

L'île qui apparut en 1796, à 10 lieues de la pointe septentrionale d'Unalaska, l'une des îles Aléoutiennes, est particulièrement célèbre. On vit d'abord sortir du sein de la mer une colonne de fumée ; ensuite un point noir, d'où s'élançaient des gerbes enflammées, apparut à la surface de l'eau. Pendant plusieurs mois que dura ce phénomène, l'île s'accrut en largeur et en hauteur. Enfin on ne vit plus sortir que de la fumée ; au bout de quatre ans, cette dernière trace des convulsions volcaniques avait même complètement cessé. L'île continua néanmoins à grandir et à s'élever ; elle formait en 1806 un cône surmonté de quatre autres plus petits. »

Nous citerons un dernier exemple de volcans sous-marins, c'est celui que nous offre l'archipel de l'île de Santorin. Le sol de cette île est formé de déjections volcaniques ou pouzzolanes naturelles, destinées à rendre de grands services dans la fabrication des bétons sous-marins. Cette matière a été employée avec succès à Trieste pour les travaux du Lloyd autrichien et aussi pour les travaux de l'isthme de Suez : M. l'ingénieur de Montaut, en a signalé les avantages dans les Annales des ponts et chaussées de 1862 :

« La formation de Santorin, d'origine volcanique remonte à plusieurs siècles avant J.-C. Elle ne présente plus aujourd'hui qu'une côte escarpée de roches basaltiques et trachytiques formant un amphithéâtre semi-circulaire de près de 16 kilomètres de diamètre (figure 4). Deux îles, Therasia et Aspronisi, qui s'élèvent à l'occident paraissent être la *Somma* du grand cratère de soulèvement dont la moitié s'est abîmée dans les flots à la suite des violents cataclysmes dont l'histoire fait mention. Du milieu de ce vaste bassin surgit d'abord l'îlot connu sous le nom de Hiera, 186 ans avant J.-C., qui s'accrut lui-même par les soulèvements de ses bords en 19, 726, 1427, de l'ère chrétienne ; puis apparurent Micra Kaméni en 1573 et Néa Kaméni en 1707, qui subirent eux-mêmes des accroissements successifs d'une manière semblable en 1709, 1711 et 1712, etc.

Fig. 4.

Il n'y a aucun cratère sur ces îlots, mais seulement des *dômes* de matières volcaniques qui semblent avoir comblé l'orifice par lequel elles sont sorties. Leur apparition a toujours été accompagnée de phénomènes ignés, de tremblements de terre, d'ébullitions des eaux de la mer, comme tous les anciens historiens le rapportent et comme le père Gorée l'a vu lui-même lors de l'apparition de Néa Kaméni de Santorin en 1707.

Depuis ces diverses éruptions, il s'est manifesté, comme nous l'avons dit, des soulèvements lents de quelques îlots qui en ont successivement agrandi la superficie.

Le même phénomène se montre encore aujourd'hui, comme il résulte des

observations de M. Virlet et d'autres constatations plus récentes. Entre Micra Kameni et le port de Phira, on trouvait 30 mètres d'eau il y a soixante ans, aujourd'hui il n'y existe qu'un passage à peine suffisant pour de légères felouques, et l'on s'attend à voir émerger bientôt quelque nouveau cône qui donnera peut-être passage à des matières ignées et viendra prendre place au milieu du vaste cirque que forment Santorin, Therasia et Aspronisi, à côté de Hiera, de Micra Kaméni et de Néa Kaméni.

Les sommets de l'île de Santorin sont dénudés et abrupts, tandis que leur base est noyée dans un talus allongé formé par la pouzzolane.

La végétation est partout rare et maigre; on cultive principalement la vigne dans le pays. L'eau des puits est saumâtre. Les habitants boivent l'eau des pluies qui est conservée dans des citernes.

C'est du milieu du bassin qu'on peut juger à première vue, non-seulement de la structure volcanique de l'île, mais encore du nombre des éruptions qui se distinguent par la différence de couleur des couches alternatives de laves, de cendres pouzzolaniques, de scories et de terre végétale. L'épaisseur de la couche de pouzzolane est dans certains points de plus de 13 mètres et peut être évaluée en moyenne à 10 mètres au moins. Cette couche couvre une si grande superficie que la pouzzolane de Santorin est pour ainsi dire inépuisable, même en supposant un développement immense des travaux maritimes et un emploi presque exclusif de cette matière. Elle est d'une pureté et d'une homogénéité parfaites, surtout à la pointe méridionale de l'île, et s'étend en talus presque jusqu'au bord de la mer, où on la charge directement dans les navires au moyen de conduits en bois. »

Soulèvements. — Chaînes de montagnes. — Nous avons vu que l'action des eaux dégradait et pulvérisait sans cesse l'écorce terrestre; les fragments enlevés se déposent dans les eaux calmes et donnent naissance aux terrains stratifiés, formés de lits horizontaux. Les transformations successives de l'écorce terrestre ont modifié profondément en plus d'un point l'horizontalité des lits, il faut chercher la cause de ces modifications dans les soulèvements produits par les masses liquides intérieures: imaginez un coin chassé de l'intérieur d'une sphère creuse vers la surface, il la déchirera et finira par saillir à l'extérieur en relevant la matière sur les bords de la fente. Tel est le phénomène des soulèvements qui ont engendré les montagnes.

Les Pyrénées en sont un exemple très-net: elles sont d'une épaisseur et d'une direction régulières, et pour en concevoir la naissance, imaginez un grand mur placé sous une vaste plaine et qui s'élèverait peu à peu. Au commencement du mouvement, le terrain se soulève et se renfle en dos d'âne, puis, si le mouvement continue, une fente se produit, le mur surgit et s'élève en entraînant latéralement les parties avoisinantes de la plaine. Mais si ces parties appartiennent à des terrains stratifiés, les différentes couches ne resteront point horizontales, elle deviendront courbes et s'inclineront d'autant plus qu'elles s'élèveront davantage; quelques-unes même pourront devenir verticales. La figure 1, pl. I, fait comprendre ce mode de soulèvement et montre comment l'inclinaison des couches peut se faire sentir jusqu'à une grande distance du faîte de la montagne.

C'est ainsi que si nous levons un profil des Pyrénées, par exemple au pic de la Maladetta, nous trouvons au centre une masse de granite, qui est la masse éruptive, et, sur les flancs, du côté de France et du côte d'Espagne, nous rencontrons, à partir du granite: 1° les schistes de transition, 2° le calcaire jurassique, 3° le grès vert, 4° la craie supérieure, 5° et enfin le terrain tertiaire. Le

soulèvement est même écrit sur certains sommets où l'on retrouve des lambeaux de terrains de sédiment, et c'est un fait curieux que d'apercevoir sur des cimes aussi élevées des calcaires remplis de coquilles fossiles.

Systèmes de montagnes.—Voilà donc la cause de la formation des montagnes. Il nous reste à examiner si toutes les montagnes ont le même âge et si elles sont distribuées sans aucune loi sur la surface du globe.

Pour résoudre cette question, il nous suffira d'esquisser rapidement ici les principaux traits de la notice de M. Élie de Beaumont sur les systèmes de montagnes.

Il est rare de trouver des montagnes isolées, en général elles sont accolées les unes aux autres, de telle sorte que leurs cônes se pénètrent, et qu'il est impossible de faire le tour de l'une d'elles sans monter à une hauteur égale à la moitié ou au tiers de la hauteur des cimes. On appelle col le point le plus bas par où l'on puisse passer entre deux montagnes ; c'est évidemment le point le plus praticable au voyageur qui se dirige d'un versant sur l'autre ; l'altitude des cols est souvent considérable, et souvent le passage n'en est libre qu'à certaines époques de l'année.

La réunion de montagnes qui se pénètrent constitue une chaîne composée d'un ou de plusieurs chaînons rectilignes. Tout chaînon rectiligne constitue un système.

L'ensemble des terrains stratifiés se divise en plusieurs groupes que l'on distingue entre eux par leur constitution physique et chimique et surtout par les différents fossiles, débris animaux et végétaux, qu'on y rencontre. Lors de la formation d'un groupe, la vie animale et végétale ne s'est point manifestée par les mêmes espèces que pendant la formation du groupe voisin. Dans chaque groupe, les couches affectent une stratification concordante ; mais d'un groupe à l'autre la stratification est généralement discordante (figure 2, planche I), c'est-à-dire que les lits du système A, quoique parallèles entre eux ne sont pas parallèles à ceux du système B ; nous venons de dire plus haut que les fossiles de A diffèrent et quelquefois d'une manière complète de ceux de B.

Supposons les couches de B horizontales, cela prouve que ce terrain de sédiment n'a pas encore été modifié et qu'il est resté tel qu'il s'était déposé ; mais il a fallu alors que A ait été soulevé, et que de ce soulèvement soit résulté un cataclysme, un changement complet dans la vie et dans l'aspect du lieu considéré. Ce soulèvement des couches A a-t-il duré longtemps ? Non, car entre les groupes A et B il n'existe point de couche sédimentaire qui se raccorde à l'un et à l'autre.

Les diverses époques de l'histoire du globe sont donc séparées par des révolutions violentes. Nous venons de voir d'autre part que les montagnes résultaient de l'éruption de masses énormes perçant l'écorce terrestre. Ces deux phénomènes sont-ils indépendants l'un de l'autre ? Non, et le dernier est la cause du premier.

C'est à la suite de chaque soulèvement considérable, que la surface du sol a complètement changé, que le cours des eaux s'est modifié brusquement, que des mers entières ont vu leurs eaux s'enfuir pour aller changer en océan de vastes plaines.

C'est donc aux convulsions produites par le surgissement des hautes chaînes de montagnes qu'il faut attribuer les révolutions du globe, révolutions dont on retrouve une manifestation dans les dépôts de sédiment et dans les débris des races éteintes qu'elles renferment.

Le relèvement des couches sédimentaires sur les flancs des montagnes nous offre un moyen simple de connaître l'âge relatif des diverses chaînes.

Une observation attentive montre que le long des chaînes les couches sédimentaires récentes A (figure 3, planche I) s'étendent jusqu'au pied des montagnes sans perdre leur horizontalité, et en effet elles se sont déposées dans des mers dont ces mêmes montagnes formaient les îles ou les rivages; au contraire, les couches qui s'élèvent sur les flancs et jusqu'aux crêtes de la chaîne étaient préexistantes à la montagne, et l'on conçoit sans peine que la gibbosité a pris naissance dans l'intervalle qui sépare l'époque où s'est déposée la dernière couche relevée de l'époque voisine où s'est déposée la plus profonde des couches horizontales. Nous remarquons ici ce que nous avons déjà vu plus haut : entre les groupes A et B on ne trouve point de couche intermédiaire se raccordant à la fois avec les couches redressées et avec les couches horizontales; la naissance de la montagne a donc été un phénomène de faible durée. De plus, les diverses montagnes d'un même chaînon sont apparues simultanément ainsi que le prouve la constance de la ligne de démarcation entre les couches relevées et les couches horizontales.

Cette constance des directions moyennes suivant lesquelles les couches de sédiment se trouvent redressées sur de grandes étendues a donné lieu à d'importantes découvertes. « C'est par suite de l'observation de la constance de direction des couches houillères de certaines parties de la Belgique que des recherches ont été tentées en 1717, au milieu des terrains plats de la Flandre française, sur la direction prolongée des couches exploitées à Mons; tentative d'où est résultée l'ouverture des importantes mines de Valenciennes et d'Aniche. »

Parmi les divers chaînons que l'on rencontre sur la surface de la terre, il en est qui ont même direction ; chose curieuse, on arrive par l'examen des sédiments à reconnaître que tous les chaînons de même direction ont le même âge et sont dus à la même révolution.

Ce phénomène, entrevu par M. de Humboldt en 1792, est aujourd'hui hors de doute. Le professeur Werner a démontré que, dans une même contrée, tous les filons de même nature doivent leur origine à des fentes parallèles entre elles, ouvertes en même temps et remplies ensuite durant une même période.

L'étude exacte de toutes les chaînes de montagnes a permis de les réunir par groupes de même direction, qui par suite comprennent des montagnes contemporaines. Le nombre de ces groupes est limité; dans une contrée donnée, il est généralement peu nombreux, et les montagnes se réduisent à quelques systèmes, correspondant aux diverses révolutions que la contrée a subies dans la suite des siècles.

Ici, nous devons faire une remarque géométrique : dans une contrée donnée, on peut faire abstraction de la courbure du sphéroïde terrestre, et remplacer la portion de la surface par son plan tangent ; on conçoit alors ce que sont des lignes ou chaînes parallèles. Mais, il est besoin de définir ce que nous entendons par deux chaînes parallèles situées l'une en France, l'autre en Amérique. Tout alignement droit sur la surface du sol est un arc de grand cercle ; c'est la plus courte distance qui sépare deux points de la sphère ; une fracture de l'écorce terrestre ou, ce qui est la même chose, une chaîne de montagnes est donc toujours dirigée suivant un arc de grand cercle. Imaginons une série de grands cercles ayant un diamètre commun, et par suite même équateur (tel est le cas par exemple des divers méridiens terrestres qui tous passent par la ligne des pôles), on pourra considérer que tous les petits arcs de ces grands cercles, qui ne s'éloignent pas trop de l'équateur, sont parallèles ; en réalité, cela n'est vrai que pour les arcs élémentaires, c'est-à-dire pour les tangentes aux points où les grands cercles

considérés viennent couper normalement leur équateur, mais on conçoit bien que tant que l'on ne prend point des arcs voisins des pôles, le parallélisme est sensiblement vrai. Les différents sillons d'un même champ ou de deux champs voisins, dit M. Élie de Beaumont, ne peuvent jamais à la rigueur, s'ils sont rectilignes, présenter d'autre parallélisme que celui qui vient d'être défini, et cette définition a l'avantage d'être indépendante de la distance à laquelle les deux champs se trouvent placés.

Un système de chaînes de montagnes est donc représenté par une série de petis arcs, appartenant aux grands cercles que nous venons de définir, et on peut les considérer comme parallèles aux arcs élémentaires d'un seul grand cercle, que l'on appelle grand cercle de comparaison. Pour déterminer ce grand cercle dans la pratique, remarquons que chaque petit arc correspondant à une chaîne, peut se considérer comme la tangente d'un petit cercle parallèle au grand cercle de comparaison; il faut donc, par voie graphique ou algébrique, déduire de la position de plusieurs chaînes sur la surface du globe la position des pôles du grand cercle de comparaison commun à toutes ces chaînes. Qu'il nous suffise de donner l'énoncé de ce problème, sans en indiquer la solution qui est en dehors de notre cadre.

Le classement de toutes les chaînes de montagnes en groupes du même âge est aujourd'hui fort avancé; nous donnerons une liste sommaire des principaux systèmes en commençant par les plus anciens :

1° *Système de la Vendée, qui se prolonge sur la côte S. O. de la Bretagne et qu'on retrouve à Belle-Isle-en-Mer.* — Les schistes verts ont été relevés.

2° *Système du Finistère.* — Les couches schisteuses du terrain silurien ont été soulevées par du granite à grains fins, et inclinées généralement à 70° ou 80° sur l'horizon. On trouve des fractures parallèles dans le Bocage normand et dans la Manche. On retrouve ce système en Suède, dans le sol fondamental des Pyrénées et en Catalogne.

3° *Système de Longmynd, dirigé au N. 25° E.* — Le terrain silurien a été soulevé par ce système en Angleterre, en Bretagne, en Normandie, dans le Limousin, en Saxe, en Moravie, en Finlande, dans les montagnes des Maures et de l'Estérel. Avec des cartes bien faites, on peut se rendre un compte assez net de tous les systèmes, qu'il nous est impossible de décrire longuement.

4° *Système du Morbihan, parallèle aux côtes S. O. de la Bretagne, qui sont fort déchiquetées, et qu'on peut représenter par une ligne tirée de Saint-Nazaire à Pont-l'Abbé.* — Cette direction est regardée généralement comme caractéristique des montagnes formées de gneiss et de protogine. On la retrouve dans les départements de la Loire-Inférieure, de la Vendée, de la Corrèze, de la Dordogne et de la Charente, près de Messine, en Sicile, dans l'Ukraine, etc. Ce système doit être presque aussi vieux que ceux de Longmynd et du Finistère.

Les quatre systèmes précédents se croisent au milieu de la presqu'île de Bretagne.

5° *Système de Westmoreland et du Hundrück.* — A soulevé des schistes sur lesquels repose en stratification discordante la zone carbonifère. Il comprend les chaînes du pays de Galles, de la Cornouailles, de l'Eiffel, du Hundrük et du pays de Nassau, etc.... On peut le considérer comme un peu antérieur à la formation du vieux grès rouge proprement dit.

6° *Système des Ballons des Vosges et des collines du Bocage* (Calvados). — Les plus anciennes couches redressées appartiennent au calcaire carbonifère. Le massif des montagnes est formé de syénite.

7° *Système du Forez, dirigé au N. 15° O.*

8° *Système du nord de l'Angleterre, qui a pris naissance immédiatement après le dépôt du terrain houiller.* — La côte occidentale du département de la Manche lui appartient.

9° *Système des Pays-Bas et du sud du pays de Galles.*

10° *Système du Rhin.* — Comprenant les montagnes des Vosges, de la Hardt, de la Forêt-Noire et de l'Odenwald. Il a soulevé les grès des Vosges.

11° *Système du Morvan.* — Les couches du grès bigarré, du muschelkalk et des marnes irisées ont été soulevées, tandis que les couches du terrain jurassique se sont déposés horizontalement au pied de ces montagnes.

12° *Système de la Côte-d'Or, du mont Pilas et de l'Erzgebirge.* — S'est produit dans l'intervalle qui sépare le dépôt jurassique de la série des formations crétacées.

13° *Système du mont Viso et du Pinde.* — Correspond à l'intervalle qui s'est écoulé entre le dépôt crétacé inférieur et le dépôt crétacé supérieur.

14° *Système des Pyrénées.* — Les Pyrénées ont pris naissance, après la période du dépôt des terrains crétacés et des terrains nummulitiques, dont les couches redressées s'élèvent sur leurs flancs, et avant la période du dépôt des couches parisiennes et autres couches tertiaires. On retrouve la direction des chaînons des Pyrénées, dans les collines de Provence, dans les Apennins, dans les Alpes Juliennes, en Dalmatie, etc.

L'apparition des Pyrénées dut produire en Europe une convulsion violente, qui fut encore surpassée par celle que produisit l'apparition des Alpes. Dans l'intervalle qui sépare les deux convulsions, l'Europe fut relativement tranquille, et la plupart des assises du terrain tertiaire se déposèrent.

15° *Système des îles de Corse et de Sardaigne.* — Se produisit après la première période des terrains tertiaires, après la formation gypseuse.

16° *Système de l'île de Wigth, du Tatra et de l'Hœmus.*

17° *Système de l'Erymanthe et du Sancerrois.*

18° *Enfin arrive une révolution considérable, qui engendre le système des Alpes occidentales.* — Le massif des Alpes n'est pas sorti d'un seul jet, comme celui des Pyrénées; il est formé de plusieurs chaînons qui s'entre-croisent. A l'orient et au midi, on trouve des chaînons appartenant au système des Pyrénées; en Provence et en Dauphiné, les montagnes appartiennent au système du mont Viso, etc...., Mais les plus hautes cimes, le mont Blanc, le mont Rose, sont dues au croisement à 45° de deux systèmes récents; ces deux systèmes font un coude à la hauteur du mont Blanc et ils se pénètrent l'un l'autre, comme le montrent les prolongements des couches sédimentaires.

Les Alpes sont donc relativement très-jeunes; on trouve le terrain crétacé et ses fossiles à la crête des Fis (2700 mètres), et le deuxième étage tertiaire au Rigi (1875 mètres).

19° *Système de la chaîne principale des Alpes, depuis le Valais jusqu'en Autriche.* — On trouve dans les vallées de l'Isère, du Rhône et de la Durance, un terrain de transport que l'on s'accorde à regarder comme produit par le passage des courants qui ont suivi la dernière dislocation des masses alpines. Les couches tertiaires ont été soulevées par la chaîne principale des Alpes; le terrain diluvien seul a conservé la pente du courant qui l'a produit.

Nous bornerons ici la nomenclature des différents systèmes, sans vouloir étudier les chaînes, qui n'appartiennent pas à l'Europe.

Réseau pentagonal. — A quelle cause faut-il attribuer les fractures de l'é-

corce terrestre à travers lesquelles ont jailli les montagnes? Au refroidissement continuel du globe. Il résulte de l'expérience et du calcul que la chaleur interne doit être assez puissante pour qu'à 40 ou 50 kilomètres de profondeur, toutes les roches soient en fusion; or la masse liquide intérieure se refroidit plus vite que l'écorce, qui s'échauffe par diverses causes externes. Le noyau liquide diminue donc de volume, et l'écorce reste suspendue comme une voûte sphérique au-dessus d'un vide annulaire; or cette écorce est au plus en épaisseur $\frac{1}{250}$ du diamètre, et, par suite, infiniment plus mince relativement que la coquille d'un œuf; elle a besoin d'appuis pour se soutenir, et il faut qu'elle s'effondre pour reposer sur la masse liquide. Il tombe sous le sens que cet effondrement ou ce rempli affectera la forme la plus simple en harmonie avec la figure sphéroïdale, et en même temps celle qui demande pour se produire la moindre action, la moindre consommation de force vive; cette forme est celle d'un fuseau sphérique comprimé latéralement.

La grande étendue en longueur des diverses chaînes de montagnes, corrobore la déduction précédente. On se rend bien compte, du reste, que le mouvement de rempli se produisant, suivant une figure quelconque de la sphère, serait beaucoup plus complexe que celui qui se produit suivant un fuseau.

Toute chaîne de montagne a donc pour direction un arc de grand cercle. Traçons sur une sphère tous les cercles de comparaison des chaînes qui couvrent la terre; nous verrons, avec un peu d'attention, que tous ces grands cercles ne sont pas indépendants les uns des autres, ce qui signifie que la direction d'une première fracture a influé sur la direction d'une seconde et ainsi de suite. Les angles des divers grands cercles entre eux, se succèdent dans un certain ordre avec la même grandeur, et on arrive après quelque temps à retomber sur les premières directions.

Fig. 5.

Nous verrons en minéralogie que le basalte en se solidifiant éprouve un retrait, et que la masse se divise en prismes à base hexagonale (figure 5); cela tient à ce que le triangle équilatéral, le carré et l'hexagone sont les seuls polygones réguliers, qui puissent servir à diviser un plan en parties toutes égales entre elles, comme on le voit dans les appartements carrelés; l'hexagone a l'avantage sur les deux autres de posséder le périmètre minimum pour une surface donnée. L'effort de séparation nécessaire à la production du prisme hexagonal, est donc moindre que celui qui serait nécessaire pour avoir des prismes à base carrée ou triangulaire; aussitôt que la force de contraction atteindra la valeur de cet effort minimum, l'hexagone prendra naissance.

Par suite de sa courbure, la sphère n'est point développable sans déchirure ni duplicature; elle n'est pas divisible en hexagones réguliers ni en quadrilatères à angles droits; elle ne peut être divisée par des grands cercles qu'en parties égales qui sont, soit des triangles équilatéraux, soit des quadrilatères à angles de 120°, soit des pentagones réguliers. Le pentagone régulier sur la sphère remplace l'hexagone sur le plan; pour une surface donnée, il a le contour minimum.

Si toutes les fractures de l'écorce terrestre s'étaient produites simultanément, elles auraient divisé la surface du sphéroïde en un réseau de pentagones réguliers. Mais il n'en est pas ainsi, les chaînes de montagnes ont pris naissance à de grands intervalles, et la succession des arcs de grands cercles qui les représentent n'est pas aussi régulière que le comporte la loi précédente.

Sans entrer dans les détails, il nous suffit d'avoir fait comprendre que les montagnes n'ont pas été jetées au hasard sur la surface de la terre, comme de la poussière sur une orange, et que leur direction, leur position relative, sont réglées par des lois mathématiques que le raisonnement démontre et que l'expérience confirme.

Vallées. — La sphère n'étant pas développable et présentant pour un volume donné la surface minima, toute fracture produite suivant un arc de grand cercle a dû être accompagnée de déchirures latérales moins étendues que la chaîne principale, mais offrant souvent des crêtes aussi élevées.

C'est à ce fait que nous devons les vallées dites de déchirement, qui présentent des formes hardies et sauvages, des pentes rapides et un sol fort inégal ; elles sont profondes et étroites, et par leurs paysages grandioses étonnent le voyageur.

La plupart des vallées sont donc le résultat immédiat de l'élévation des roches cristallines qui forment les montagnes.

Les mouvements du sol ont à toutes les époques déterminé de violents courants d'eau auxquels il faut attribuer la formation de la seconde classe de vallées, les vallées d'érosion; celles-ci sont larges, peu accidentées et entourées de coteaux à pentes arrondies ; leur sol fertile est faiblement incliné.

Les vallées de l'une et l'autre classe continuent à s'agrandir par l'action des eaux courantes.

PRINCIPES SUR LESQUELS EST FONDÉE LA DIVISION DES TERRAINS STRATIFIÉS SUPERPOSITION ET CONCORDANCE DES COUCHES; DÉBRIS ORGANIQUES

Nous n'aurons guère à nous étendre sur les matières de ce chapitre, car elles ont été presque complétement traitées d'une manière incidente dans les paragraphes précédents.

La classification naturelle des terrains est fondée sur ce fait qu'à la naissance de chaque grand système de montagnes, les couches sédimentaires anciennes ont été soulevées, de grands courants se sont produits, et au milieu des eaux se sont déposées de nouvelles couches sédimentaires en stratification discordante avec les premières ; après chaque révolution, les conditions physiques de l'existence ont changé et la vie végétale et animale s'est manifestée sous de nouvelles formes.

1° *Discordance de stratification.* — Nous l'avons déjà définie : toutes les assises d'un dépôt qui se forme en eau calme sont séparées par des lits horizontaux. Qu'une montagne soulève le sol, les sédiments vont s'élever avec elle, et devenir les rivages d'une mer au sein de laquelle se déposent des couches sédimentaires en discordance avec les premières (*planche* I, *figure* 3). Arrive un nouveau soulèvement, les deux terrains A et B sont déplacés en gardant entre eux leur position relative, dans la cuvette formée se déposent de nouvelles couches horizontales et ainsi de suite. On voit d'après cela, qu'en descendant du faîte d'une montagne cristalline, ce sont les couches les plus anciennes que l'on rencontre les premières ; au centre du bassin s'étalent les couches récentes.

Sur le sol, les terrains horizontaux et les terrains inclinés (*planche* I, *figure* 3) offrent une ligne de séparation que l'on peut tracer, et qui souvent est fort utile pour classer un terrain ; en effet cette ligne est parallèle à la chaîne de montagne qui a produit le soulèvement A B ; si on la repère à la boussole, on peut

ensuite voir à quel système elle se rapporte, et par suite en déduire l'âge du terrain.

On a fait quelquefois une objection à la théorie du soulèvement des terrains sédimentaires, en disant que des assises inclinées peuvent fort bien se déposer sur les rivages d'une mer où viennent mourir des vagues tenant en suspension des matières solides. Nous assistons aujourd'hui à des phénomènes analogues ; mais les plages ainsi formées ont toujours une inclinaison très-faible et bien loin d'atteindre celle que l'on constate dans les sédiments relevés.

Une preuve concluante a été donnée il y a longtemps déjà, de l'horizontalité primitive des couches aujourd'hui relevées : c'est que dans de pareilles couches comprenant des poudingues, les galets ellipsoïdaux sont placés de manière que leur petit axe est normal aux plans de stratification, c'est-à-dire que leurs deux grands axes sont dans un plan parallèle au plan de stratification. Cette disposition serait contraire aux lois de la pesanteur, si la couche avait été primitivement dans sa position inclinée ; car tout corps pesant entraîné par les eaux ne s'arrête que dans la position que lui donne le maximum de stabilité, c'est-à-dire lorsqu'il repose sur son côté le plus large, ou pour un ellipsoïde, lorsque son grand axe est horizontal.

De cette démonstration par l'absurde, il faut conclure que les couches ont été relevées postérieurement à leur naissance.

2° *Retour périodique des couches de transport violent et de sédiment tranquille.* — A la suite de chaque révolution, les premières couches sédimentaires du nouveau terrain ont dû être formées de cailloux et de galets plus ou moins gros enlevés aux roches préexistantes ; aussi trouvons-nous à la base de chaque terrain des assises remplies de galets dont la grosseur diminue à mesure que l'on s'élève. Au-dessus de ces couches on trouve les grès, puis les argiles, sorte de vase solidifiée ; la ténuité du grain va en augmentant à mesure que l'on s'élève.

Ces dépôts terminés, a commencé une période calme pendant laquelle la vie s'est développée, et avec elle apparaissent les couches calcaires de formation chimique.

Le passage entre ces différents ordres de couches n'est jamais brusque ; on passe par exemple des argiles aux calcaires par des marnes ou calcaires argileux.

3° *Nature des fossiles que l'on rencontre dans les divers terrains.* — La vie est apparue sur la terre aussitôt que celle-ci a été assez refroidie pour que les vapeurs aqueuses pussent se condenser. Elle s'est manifestée d'abord par ses plus simples représentants, aussi bien dans l'ordre animal que dans l'ordre végétal ; elle a changé d'aspect à la suite de chaque cataclysme, et les fossiles nous enseigneront que l'on s'élève sans cesse dans l'échelle des êtres à mesure que l'on monte des terrains primitifs aux terrains actuels.

C'est d'après ces principes que l'on classe aujourd'hui les terrains d'origine neptunienne en cinq grandes classes :

1° Terrains de transition ou paléozoïques ;
2° Terrains secondaires ;
3° Terrains tertiaires ;
4° Terrains quaternaires ; } Presque toujours réunis en une seule classe portant le nom de terrains tertiaires.
5° Terrains actuels ;

DESCRIPTION SOMMAIRE DES TERRAINS, LEUR DISTRIBUTION SUR LE SOL DE LA FRANCE, LEUR ASPECT GÉNÉRAL, LEURS ÉTAGES PRINCIPAUX

Terrains de transition ou paléozoïques. — Ce sont les sédiments les plus anciens ; par leur voisinage des roches cristallisées, qui les traversent et les supportent, ils ont été souvent métamorphisés, et ont pris eux-mêmes un aspect cristallin. Toutefois il n'y a pas à se tromper sur leur origine lorsqu'on les observe à une grande distance des masses éruptives qui les ont traversés et modifiés ; du reste, on y rencontre des fossiles appartenant aux premiers êtres organisés, d'où le nom grec paléozoïques (êtres anciens).

Leur nom de terrains de transition vient naturellement de la place qu'ils occupent et des caractères intermédiaires qu'ils présentent entre les roches cristallines et les sédiments de l'époque secondaire.

Les terrains paléozoïques se subdivisent en :

1° Terrain silurien ;
2° Terrain devonien ;
3° Terrain houiller ou carbonifère ;
4° Terrain permien.

1° *Terrain silurien.* — Il tire son nom de la région de l'Angleterre où on le rencontre, région habitée autrefois par la peuplade des Silures.

Il commence par une couche de gneiss et de micaschistes qui surmonte le granite et se fond avec lui. Vient ensuite une assise fossilifère composée de calcaires mélangés d'ardoises grossières, et qui porte le nom de dalles de Llandeilo. Au-dessus, des grès rouges à oxyde de fer, qu'on appelle grès de Caradoc (*Caradoc sandstone*).

Après les grès de Caradoc, il y a un intervalle rempli par des roches éruptives (trapps et mélaphyres), puis on trouve une série de couches argileuses et calcaires qui constitue les calcaires de Wenlock (*Wenlock limestone*). Au-dessus du calcaire de Wenlock, viennent deux grandes masses d'ardoises entre lesquelles s'est interposé un calcaire, le calcaire d'Aymestry (*Aymestry limestone*).

C'est surtout en Bohême que l'on peut étudier facilement le terrain silurien, il y est contenu dans une cuvette elliptique, et les diverses assises y sont empilées comme une série d'écuelles décroissantes, de sorte qu'en parcourant un diamètre de l'ellipse, on rencontre deux fois chaque couche. Au-dessus du granite, on trouve une couche de micaschites ne renfermant pas de fossiles, puis des schistes verdâtres, un intervalle marqué par une éruption de porphyre, une couche épaisse de dalles en grès de couleur grisâtre, un autre intervalle marqué par une éruption de trapps, puis des argiles noires mélangées de calcaires, enfin des calcaires blancs auxquels on arrive par une transition ménagée.

On voit d'après cela, que l'on peut subdiviser le terrain silurien en trois étages principaux.

On trouve le terrain silurien en France, dans la Bretagne et la Manche, et dans le Languedoc. Lors de la formation silurienne, toute l'Europe était sous les eaux, excepté la Laponie, et deux îles granitiques en France, l'une formée de la Bretagne et de la Vendée, l'autre formée du plateau central.

Le terrain silurien est excessivement disloqué, et cela se conçoit si l'on réfléchit au grand nombre de révolutions qu'il a subies.

Fossiles du terrain silurien. — Les plus importants sont les trilobites, qui sont de l'ordre des crustacés, comme l'écrevisse et le crabe. Leur corps avait la forme d'un bouclier, et était recouvert d'une carapace que l'on retrouve seule ; il est divisé en trois parties ou lobes par deux sillons longitudinaux. On distingue trois parties dans l'animal ; la tête qui est arrondie, le thorax formé de lobes

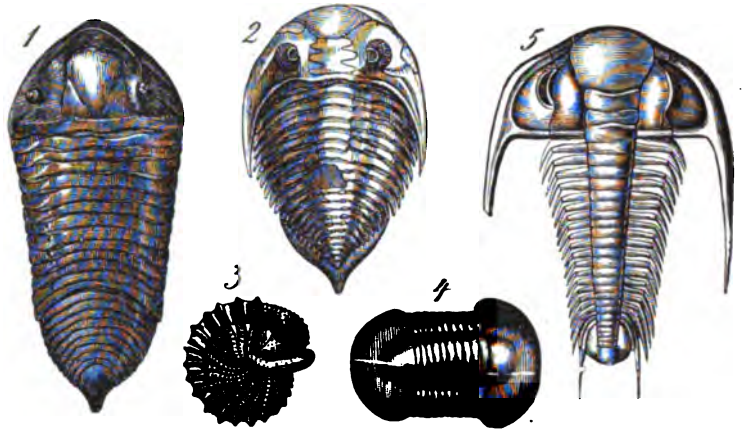


Fig. 6.

articulés, et la queue ou pygidium. Le trilobite ressemble au cloporte actuel ; comme lui, il peut s'enrouler en boule; il vivait dans les bas-fonds et nageait sur le dos. La figure 6 nous représente divers genres de trilobites. Le n° 1 est un homalonothus, le n° 2 un asaphus, le n° 3 est un calymène, le n° 4 est du genre illœnus, et le n° 5 du genre paradoxides. Les figures suffisent à indiquer comment se distinguent les divers genres. Ces figures sont de grandeur naturelle.

Avec les trilobites, on rencontre des brachiopodes, formés de coquilles à deux valves dans lesquelles habite l'animal ; entre les deux valves est un orifice par où sortaient des bras qui se développent en spirales.

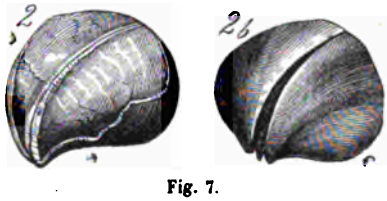


Fig. 7.

La figure 7 représente le genre pentamère ($\frac{1}{3}$ grandeur naturelle).

Citons encore comme fossiles du terrain silurien les lingules, quelques céphalopodes, analogues aux nautiles actuels, mais en différant en ce sens que la coquille est droite (orthoceras) au lieu d'être enroulée en spirale, et enfin de nombreuses empreintes que l'on appelle graphtolithes.

En fait de végétaux, on trouve des empreintes d'algues et de lycopodes.

2° *Terrain devonien.* — En Belgique, il renferme trois assises : la première est quartzeuse, et comprend à la base des poudingues, surmontés de grès dont on se sert pour faire des creusets et d'ardoises métamorphiques ; la seconde est le calcaire noirâtre de Givet, qui donne les marbres de Sainte-Anne en calcaire métamorphique ; la troisième renferme des schistes surmontés de grès micacés, elle constitue les psammites du Condros.

En Angleterre, ce terrain apparaît dans le Devonshire qui lui a donné son nom ;

il comprend des grès, des grauwackes, des schistes et des calcaires mélangés de couches de houille.

C'est surtout sur les bords du Rhin et dans l'Eifel que l'on remarque la grauwacke, qui est une roche arénacée composée d'éléments plus ou moins anguleux, empruntés aux roches primitives.

La grauwacke de l'Eifel existe en France dans la rade de Brest, à Nehou dans la Manche et à Ferques dans le Boulonnais.

C'est dans les couches devoniennes qu'on recueille les plus vieux combustibles connus; elles sont très-riches en minerais de zinc, de fer et de plomb.

Fossiles du terrain devonien. — La période devonienne est le règne des Brachiopodes. Parmi les principaux on remarque le genre stringocephalus, le genre

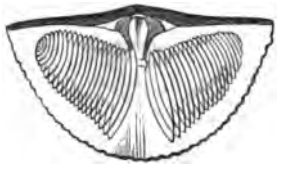


Fig. 8.

Fig. 9.

spirifer (*fig.* 8) et le genre calceola. On rencontre aussi des céphalopodes, parmi lesquels nous citerons le genre clymenia (*fig.* 9) analogue au nautile actuel.

« Cet animal, dit M. le professeur Bayle, a une organisation compliquée : deux gros yeux lui permettent de voir sa proie et un bec corné assez fort de la saisir ; il respire au moyen de quatre branchies. Il a une coquille spirale, nacrée intérieurement, symétrique et offrant, quand on la coupe par le milieu, une série de loges vides, dont l'animal n'occupe que la dernière ; ces loges sont séparées par des cloisons peu courbées, simples, traversées par un siphon dans lequel est un ligament charnu attaché au manteau de l'animal et le fixant ainsi à la coquille. »

On ne retrouve plus que la coquille avec ses cloisons.

Les végétaux de la période devonienne sont des fucus et des algues ; on voit apparaître un dicotylédone, de la famille des conifères, l'astéro-phyllites coronata, aujourd'hui disparu.

Le calcaire n'existe pour ainsi dire qu'à l'état d'exception dans les terrains qui précèdent ; nous allons maintenant le voir se développer en assises puissantes. A cette époque, la mer couvrait la plus grande partie de la terre ; de l'intérieur du globe devaient s'élever des sources thermales considérables, de véritables fleuves bouillants chargés de bicarbonates de chaux et de magnésie. L'excès d'acide carbonique se dégageait dans l'atmosphère et le calcaire se déposait au sein des eaux.

3° *Terrain carbonifère.* — Ce terrain est formé à la partie inférieure par d'immenses assises de calcaire, dit calcaire carbonifère.

Ce calcaire est généralement noir, et répand une odeur infecte quand on le brise par suite du dégagement des gaz résultant de la décomposition des matières organiques : quelquefois il est coloré en rouge ou en vert par des oxydes de fer.

En Angleterre, le calcaire carbonifère a été soumis à des soulèvements consi-

dérables et on lui donne le nom de calcaire de montagne (*mountain limestone*).

En Belgique on le trouve à Visé; il est de couleur noire, parsemé de petites coquilles blanches fossiles, et donne alors le marbre petit granit des environs de Mons.

On le trouve à la surface du sol en France dans le Boulonnais, et sur une faible superficie dans le bassin houiller de la Loire.

Aux États-Unis, le terrain carbonifère présente un puissant développement.

Fossiles du calcaire carbonifère : trilobites du genre philipsia. Quelques spirifers existent encore. Parmi les brachiopodes, c'est le genre productus qui domine; la figure 10 représente le productus giganteus qui a 10 à 15 centimètres de longueur. On trouve aussi plusieurs formes remarquables de nautiles.

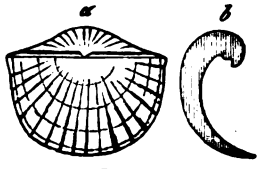


Fig. 10.

Au-dessus du calcaire carbonifère, commence le véritable terrain houiller, formé à la base de conglomérats renfermant souvent des blocs énormes; au-dessus viennent des grès et des schistes. Au milieu de toutes ces roches indistinctement, on trouve des couches de houille. Il y a aussi des rognons argileux de carbonate de fer, et c'est la présence de ce fer au milieu de la houille qui est si favorable à l'Angleterre.

Sur tous les grès et les schistes, on trouve de nombreuses empreintes de végétaux; dans certaines mines, on a mis au jour des troncs d'arbres entiers.

Nous étudierons en minéralogie la formation de la houille; il nous suffira d'indiquer ici les principaux végétaux qu'on y rencontre.

La végétation comprenait des prêles, des fougères, des lycopodes et quelques

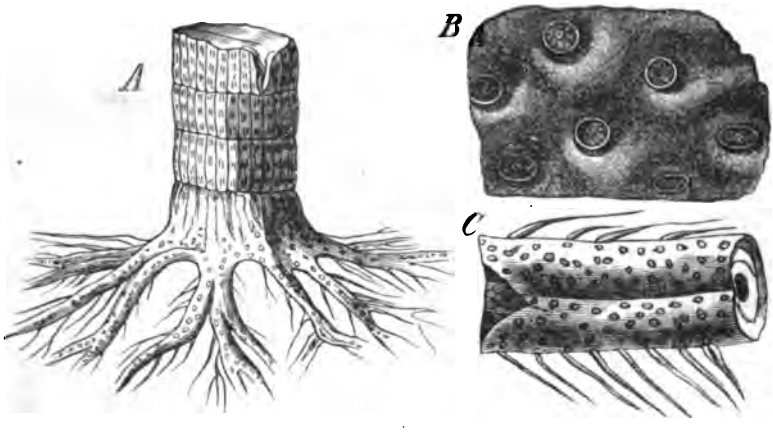


Fig. 11.

décotylédones gymnospermes, parmi lesquels nous citerons le sigillaria, représenté par le dessin A de la figure 11.

Le dessin B donne l'écorce amplifiée, et le dessin C les racines.

Longtemps on a pris les racines du sigillaria pour un végétal particulier, mais on voit que c'était une erreur, reconnue du reste depuis longtemps par les mineurs qui savent bien qu'on ne trouve jamais au même étage des sigillaria et des stigmaria (nom qu'on avait donné aux racines des premiers.)

Citons encore les calamites dont la figure 12 donne une tige ; c'est un tube creux à cloisons horizontales et revêtu de côtes longitudinales. Ces calamites pouvaient atteindre 10 à 12 mètres.

Fig. 12.

La figure 13 donne une feuille de nevropteris ; la figure 14 représente l'annularia brevifolia de la famille des asterophyllitées, et la figure 15 l'asterophyllites foliosa.

On voit apparaître dans le terrain houiller le premier reptile, l'archegosaurus, dont la figure 16 représente la tête et quelques poissons qui existaient déjà en petit nombre dans le terrain devonien.

4° *Terrain permien.* — Il est très-développé en Thuringe et dans le Mansfeld. La première assise comprend des grès rouges qui commencent par des conglomérats et finissent par des argiles, c'est le *rothe todte liegende* des Allemands ; ils l'appellent terrain mort (*todt*) parce qu'on n'y trouve point de minerai.

Au-dessus viennent des schistes noirs que l'on exploite pour en tirer le cuivre qui y est à l'état de pyrite. Ce terrain est le kupferschiefer.

Arrive ensuite le zechstein, qui comprend des couches de calcaire noir foncé mélangées de marnes et de dolomies.

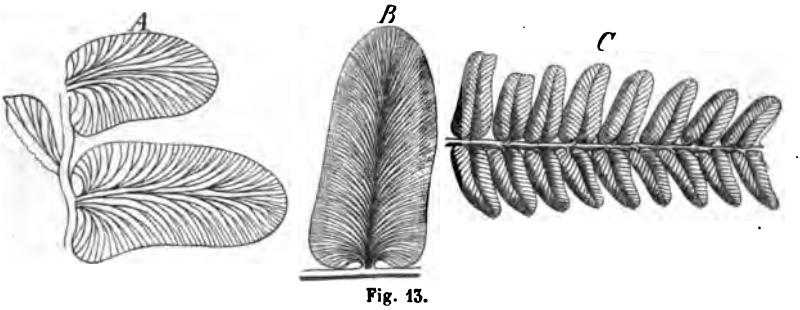


Fig. 13.

On reconnait le terrain permien en Russie, près de Perm ; en France, dans la Haute-Saône (forêt de la Serre), à Autun où l'on trouve au-dessus du terrain

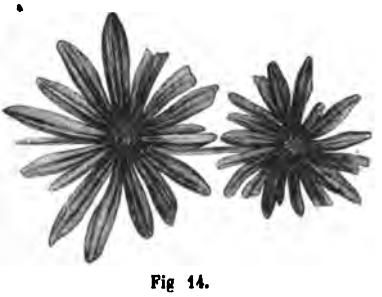


Fig 14.

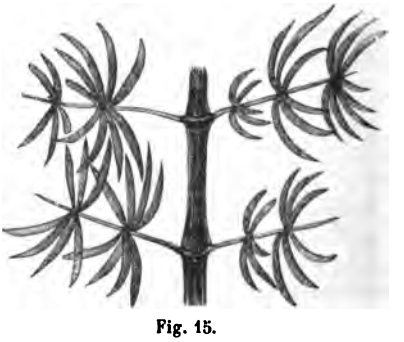


Fig. 15.

houiller des schistes que l'on distille pour avoir l'huile minérale, et à Lodève, dans l'Hérault.

Dans le Kupferschiefer, les fossiles végétaux sont des calamites, des fougères et spécialement des conifères du genre walchia. Parmi les animaux on remarque

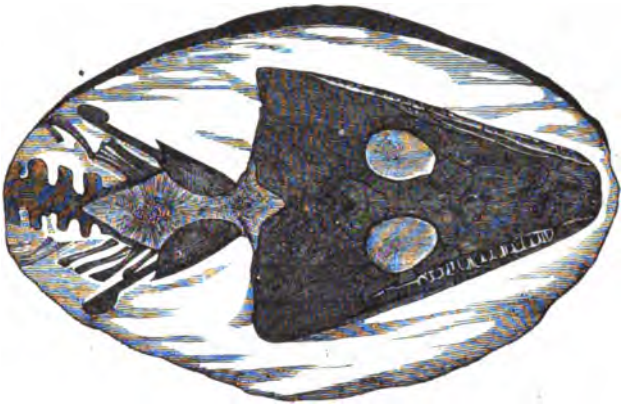


Fig. 16.

des poissons hétérocarques, entre autres le genre paleoniscus (*fig.* 17[1]) ; chez ces poissons, la colonne vertébrale se dévie à la queue, tandis que chez les poissons ordinaires (*fig.* 17[2]) elle se termine en ligne droite. Ces poissons sont tous

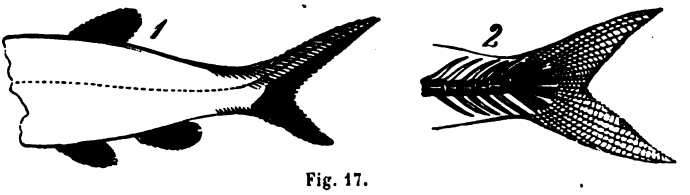


Fig. 17.

contournés sur eux-mêmes, la tête semble vouloir mordre la queue ; ces symptômes indiquent qu'ils ont péri par mort violente, empoisonnés sans doute par l'invasion des sources cuivreuses.

TERRAINS SECONDAIRES

Les terrains secondaires se subdivisent en trois groupes d'assises qui sont, en commençant par le plus ancien :

1° Le terrain triasique ;
2° Le terrain jurassique ;
3° Le terrain crétacé.

1° *Terrain triasique.* — Son nom vient de ce qu'on remarque dans cette période trois étages principaux : grès bigarré, muschelkalk ou calcaire coquiller, et marnes irisées.

Ce terrain est bien développé en Lorraine. Au pied du massif granitique des Vosges, le sol montre d'abord une roche arénacée de couleur rouge qui est le grès

vosgien, et que l'on rapporte quelquefois, mais à tort, à la période permienne.

Puis, apparaît une autre roche arénacée formée de grains blancs de quartz réunis par une argile tantôt rougeâtre, tantôt verdâtre; c'est le grès bigarré, dont la couleur est due à des oxydes de fer et qui contient toujours des lamelles de mica. Lorsque celles-ci deviennent abondantes, la roche se débite en dalles minces propres à couvrir les maisons. Le grès bigarré est une excellente pierre de construction, dont on a fait la cathédrale de Strasbourg ainsi que les soubassements des Halles centrales et du palais de l'Industrie.

Au-dessous du grès bigarré, vient un calcaire noir très-étendu, que l'on trouve à Lunéville, qui est tout parsemé de coquilles fossiles, d'où son nom de calcaire coquiller ou muschelkalk.

Nous trouvons ensuite les marnes irisées, qui présentent toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, et qui se distinguent par des amas de gypse, d'anhydrite et de sel gemme (on exploite celui-ci à Dieuze et à Vic).

En Angleterre, on retrouve le terrain triasique; mais le grès vosgien et le muschelkalk manquent.

Fossiles de la formation triasique: les trilobites ont disparu, les mollusques brachiopodes et céphalopodes sont bien moins nombreux.

Nous voyons apparaître les ammonites, et les reptiles sauriens commencent à se montrer pour se développer dans la période suivante.

Parmi les végétaux, les conifères se développent aussi.

Le grès bigarré, le calcaire coquiller ont les mêmes fossiles : les végétaux sont des conifères du genre woltzia ; les animaux sont des ammonites, parmi lesquels

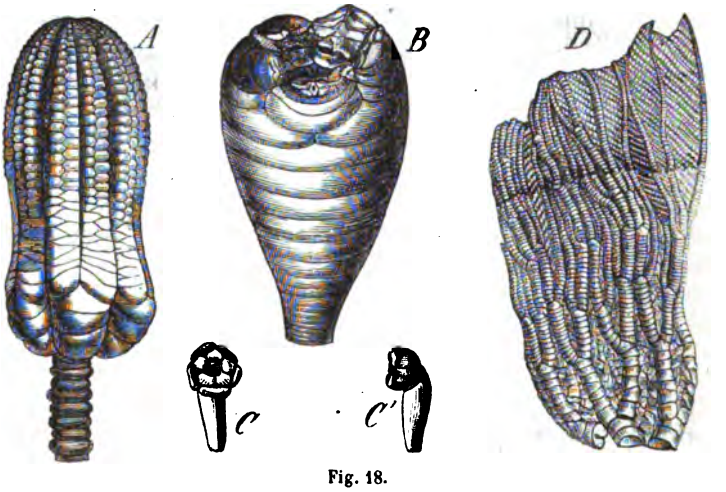


Fig. 18.

on remarque le genre ceratites, des térébratules (coquille bivalve), des polypiers, au nombre desquels nous citerons l'encrinites liliiformis (*fig.* 18) qui se compose d'une longue tige articulée fixée au rocher, le corps est enfermé dans une enveloppe calcaire A qui s'ouvre et de laquelle sortent des bras ou tentacules amenant la nourriture à la bouche de l'animal : B est l'apiocrinus rotundus, C et C' l'eugeniacrinus mutans, et D le pentacrinus Briareus.

Le grès bigarré et le muschelkalk constituent ce que l'on appelle quelquefois la période conchylienne (coquille) et les marnes irisées la période salifèrienne ;

celle-ci ne renferme que fort peu de fossiles, seulement quelques petites coquilles.

On trouve sur les bancs argileux de la période triasique des empreintes de pas

Fig. 19.

d'animaux (*fig.* 19) et des débris du squelette des mêmes animaux qui sont des batraciens gigantesques auxquels on a donné le nom de labyrinthodon. Sur d'au-

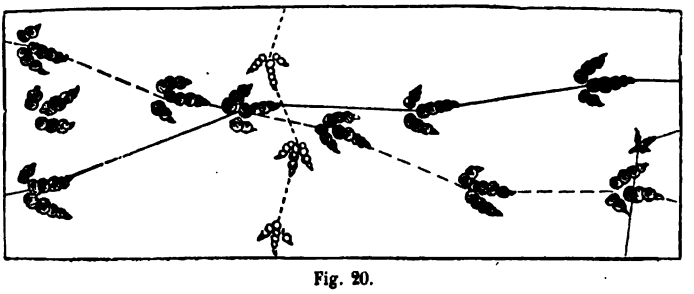


Fig. 20.

tres couches on a découvert des empreintes qui semblent produites par le pas d'un oiseau (*fig.* 20) mais il semble plus naturel de les attribuer à un reptile. Signalons encore des empreintes de gouttes de pluie.

2° *Terrain jurassique.* — C'est dans le Jura que ce terrain présente tout son développement. On le divise en deux autres terrains : le lias (les Anglais appellent ainsi un calcaire que l'on trouve dans ce terrain), et l'oolithe qui se divise en oolithe inférieure, moyenne et supérieure.

Si l'on veut résumer le système, on peut dire que le lias est un étage calcaire, et que chaque oolithe comprend deux étages : en bas, des marnes, et au-dessus, des calcaires.

Lias. — Il a une épaisseur moyenne d'environ 100 mètres ; on trouve à la base des grès quartzeux employés en Allemagne comme pierre à bâtir ; au-dessus viennent des calcaires compactes argilifères, qui fournissent le ciment de Pouilly, une couche d'argile sans fossiles de 5 mètres de hauteur, les grès d'Hettange, de nouveaux calcaires bleuâtres, dont quelques couches sont argileuses. Les couches précédentes composent le lias inférieur. Le lias moyen comprend des marnes, des argiles renfermant des rognons calcaires, il se termine dans la Haute-Saône par une couche de fer oolithique bien exploitée. Le lias supérieur comprend des marnes surmontées de calcaires argileux fournissant le ciment de Vassy, et se termine encore par des marnes ; à ce niveau se rencontre le minerai de fer d'Hayange (Moselle).

En France, le lias apparaît en Lorraine, en Bourgogne, aux environs de Lyon et dans le Calvados.

Fossiles du lias. — Aux différents étages du lias on rencontre des ammonites de divers genres qui distinguent en partie ces étages les uns des autres.

Les ammonites figuraient en petit nombre dans le trias ; elles sont caractéristiques de la période jurassique. C'est un animal analogue au nautile actuel dont nous avons déjà parlé; son corps est enfermé dans une coquille spirale divisée

Fig. 21.

Fig. 22.

Fig. 23.

par des cloisons, il n'occupe que la chambre extérieure et se prolonge dans les autres par un tube ou siphon; l'animal ayant la faculté d'absorber ou de rendre de l'eau par ce siphon, peut flotter à la surface des eaux ou s'enfoncer dans les profondeurs.

Le lias inférieur renferme les ammonites planorbis, Taylori (*fig.* 21);
Le lias moyen renferme les ammonites Davœi, Margaritatus, etc.;
Le lias supérieur renferme les ammonites Aalensis (*fig.* 22), Bipartitus (*fig.* 23).

Un mollusque céphalopode qu'on voit apparaître pour la première fois est la bélemnite. « C'était, dit M. Bayle, auquel nous empruntons le dessin de la bélemnite restaurée (*fig.* 4, *pl.* I), un céphalopode analogue aux calmars actuels. Le corps était allongé, cylindrique, constituant une sorte de sac A renfermant les viscères ; sa partie supérieure est formée par la tête B, très-nettement séparée du reste du corps. Elle porte deux yeux (*a*, *a*), très-volumineux, et est couronnée de dix appendices mobiles ou bras : huit d'entre eux (*b*) sont courts et munis dans toute leur étendue de deux rangs de ventouses armées de crochets cornés, très-solides, comparables à ceux de certains céphalopodes des mers tropicales. Les deux autres bras, insérés de chaque côté entre le premier et le second bras antérieur, sont longs, grêles et fortement contractiles. La bouche, placée au centre du disque formé par les dix bras était sans doute armée de deux mandibules cornées analogues au bec d'un perroquet. Le sac, à la partie antérieure du côté ventral, présente une fente (*mn*), destinée à laisser pénétrer l'eau de la mer dans une cavité spéciale isolée par des membranes des autres parties du corps et contenant les branchies respiratoires. L'eau, qui a servi à la respiration, est expulsée par un mouvement général de contraction ; mais, comme alors la fente *mn* est fermée, l'eau s'échappe par un tube conique placé à la partie antérieure de la tête et nommé entonnoir *k*. En même temps, il se produit un mouvement de recul rapide de l'animal, qui peut en outre se mouvoir à l'aide de ses deux nageoires D. L'estomac est une poche intérieure réunie à la bouche par un conduit, lequel sert à la fois au passage de la nourriture et au passage des déjections.

Comme les autres céphalopodes, les bélemnites pouvaient échapper à leurs ennemis en obscurcissant l'eau autour d'elles au moyen d'une liqueur noire sécrétée par une poche à encre. Cette substance, insoluble dans l'eau, a été quelquefois conservée à l'état fossile avec la poche qui la contient.

Dans l'épaisseur du tissu de la partie dorsale de la bélemnite était un osselet analogue à la plume du calmar et à l'os de la seiche. La pointe ou rostre est une pièce cylindro-conique formée par une série de cônes calcaires à parois minces, emboîtés les uns aux autres, et soutenus par une série de petits piliers calcaires normaux ou cônes, disposition qui rendait ce corps caverneux pendant la vie de l'animal ; les vides étaient remplis de matière animale. »

C'est cette partie calcaire de forme conique que l'on retrouve dans les terrains et à laquelle on donne le nom de bélemnite en prenant la partie pour le tout. La figure 24 en représente plusieurs.

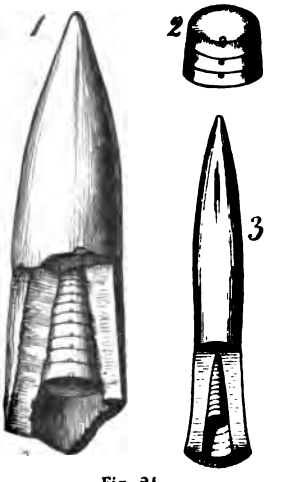


Fig. 24.

Dans le lias inférieur, on trouve la *belemnites acutus ;*
Dans le lias moyen, — la *belemnites paxillosus*, etc.;
Dans le lias supérieur, — la *belemnites irregularis*, etc.

Parmi les fossiles du lias, on signale encore des représentants du genre huître ou ostrea, par exemple, la gryphée arquée (*ostrea arcuata*) (*fig.* 25), l'*ostrea*

Fig. 25.

Fig. 26.

Fig. 27.

Marshii (*fig.* 26), l'*avicula inæquivalvis* (*fig.* 27), le *pecten æquivalvis*, la *lima gigantea*, etc.

Aux céphalopodes et aux mollusques, il faut ajouter des zoophytes, tels que les astéries ou étoiles de mer, et surtout des reptiles d'une grandeur et d'une structure étonnantes. Dans le lias inférieur on trouve des quantités de dents de sauriens ; on rencontre aussi dans ce terrain des coprolithes ou excréments fossiles (*fig.* 28) dans lesquels on retrouve des os de poissons et de reptiles. La figure 28 donne un coprolithe en grandeur naturelle; l'intérieur des intestins est encore moulé à la surface. Il appartient à l'ichthyosaure dont on a recueilli les squelettes complets, et dont nous donnons (*fig.* 5, *pl.* I) le croquis du squelette ; ce reptile atteignait jusqu'à 10 mètres de longueur.

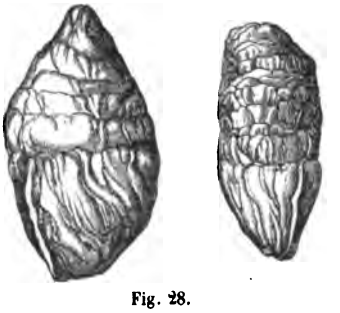


Fig. 28.

A côté de l'ichthyosaure, se présente un autre reptile dont la figure 6, planche I, donne un croquis, c'est le plésiosaure, qui possède la tête du lézard, avec des dents de crocodile, un cou qui est un corps de serpent, le tronc et la queue d'un quadrupède, et les nageoires de la baleine. Il atteint les mêmes dimensions que l'ichthyosaure.

Signalons encore le ptérodactyle que l'on peut comparer au dragon de la Fable.

Pendant la période du lias, la végétation était des plus luxuriantes, des prêles, des roseaux gigantesques, des fougères, des conifères, et enfin les cycadées qui se rapprochent des palmiers : ceux-ci paraîtront dans la période prochaine.

Oolithe inférieure. — Le terme général d'oolithe vient de ce que ces terrains sont formés par l'agrégation de petits grains ronds semblables à des œufs de poisson (*ôon*, œuf et *lithos*, pierre).

Dans l'oolithe inférieure on distingue bien des couches : par exemple, en Normandie, les couches successives sont : 1° des marnes sableuses qu'on appelle malière (*belemnites gladius*, *ammonites Murchisonæ*) ; 2° l'oolithe inférieure ferrugineuse, calcaire très-dur renfermant des grains ferrugineux (*belemnites giganteus*, *ammonites Parkinsoni*) ; 3° l'oolithe blanche, semblable à la précédente excepté qu'elle ne contient pas de fer ; 4° la terre à foulon, qui comprend les argiles bleuâtres mêlées de calcaires qu'on trouve à Port en Bessin ; cet étage à Caen est formé d'un calcaire, excellent pour la construction, et employé à bâtir les églises de Londres ; 5° la grande oolithe, comprenant à la base des calcaires durs propres à la construction et portant le nom de caillasse de Ranville, puis vient le calcaire à polypiers de Ranville, qui à la partie supérieure fournit des dalles composant la couche appelée dalle nacrée (*ammonites arbustigerus*, *terebratula digona*).

En Bourgogne, l'oolithe inférieure présente les couches suivantes : 1° la malière ; 2° le calcaire à entroques correspondant à l'oolithe ferrugineuse (les entroques sont les articulations d'animaux analogues à l'*encrinites moniliformis*) ; 3° le calcaire à polypiers qui remplace l'oolithe blanche, 4° le calcaire jaunâtre correspondant à la terre à foulon ; 5° la grande oolithe qui comprend l'oolithe miliaire formée d'un grain petit et régulier semblable au millet, l'oolithe grossière et la dalle nacrée.

Fossiles de l'oolithe inférieure ; en dehors des ammonites, bélemnites, térébratules que nous avons signalées pour chaque couche entre parenthèses, l'oolithe inférieure présente les premiers types de ces animaux curieux, les marsupiaux, qui sont intermédiaires entre les reptiles et les mammifères, et qui sont aujourd'hui représentés par la sarigue et le kanguroo.

Oolithe moyenne. — L'oolithe moyenne peut s'étudier sur le rivage de la Manche entre Cabourg et Trouville ; elle comprend : 1° des marnes gris bleuâtres qui se délitent sous l'influence des agents atmosphériques, et qui déterminent souvent la chute de pans entiers de falaises. Recouvertes de goëmons, ces marnes sont bien connues dans le pays sous le nom de vaches noires (*ammonites hecticus*, *ammonites athleta*, *belemnites excentralis*) ; à cet étage correspond les kelloway-roks des Anglais formés d'un calcaire très-dur ; 2° des marnes noires mélangées d'assises calcaires (*ammonites perarmatus*), et représentées en Angleterre par l'argile d'Oxford (*Oxford clay*) ; 3° un étage appelé étage corallien (*coral rag* des Anglais), et formé de deux couches que l'on voit à Trouville ; en bas, un calcaire bleu oolithique (*ammonites Achilles*, *cidaris florigemma* du genre oursin), et au-dessus un calcaire à texture lâche parsemé de polypiers.

Le kelloway-rok se retrouve dans la Sarthe avec deux assises de plus, et dans les Ardennes où il est à l'état d'argile.

Dans les Ardennes, l'oxford-clay renferme des minerais de fer, et en Bourgogne, on retrouve ce même étage à l'état de calcaire de Vermanton.

A la Voulte (Ardèche), l'oolithe moyenne renferme des mines précieuses de fer oligiste.

Dans le Dauphiné, le calcaire de l'Échaillon, employé à la colonnade du nouvel Opéra, appartient à l'étage corallien.

Fossiles. — Nous avons signalé entre parenthèses les fossiles caractéristiques de chaque couche. C'est dans cette période qu'apparaissent les premiers oursins; l'animal est renfermé dans un test calcaire formé de plaquettes dont les jointures se dessinent à la surface, il est assez complexe et appartient à la classe des échi-

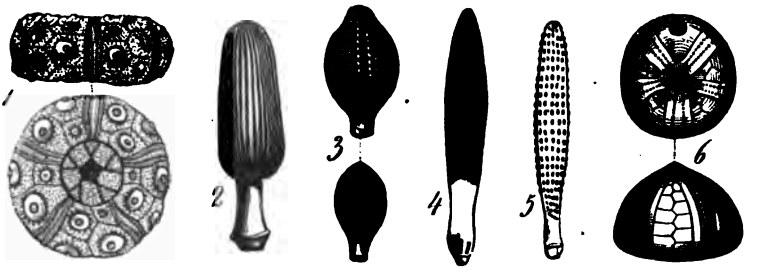


Fig. 29.

nodermes, dont il existe encore de nombreux échantillons. Il est évident qu'on ne retrouve plus que le test. La figure 29 [1] représente un oursin du genre cidaris: la bouche est centrale et de section pentagonale; autour de la bouche on trouve dix plaquettes, les unes à quatre côtés, sont les plaquettes génitales, percées de pores, et communiquant, suivant le sexe, à l'appareil mâle ou à l'appareil femelle, les autres, à section triangulaire portent les yeux. Dans les cidaris, l'anus est opposé à la bouche et occupe le centre du test; sur le test, on trouve des tubercules qui portaient des baguettes plus ou moins grosses, plus ou moins pointues; la figure 29 [2] donne la baguette du *cidaris coronata*, les nos 3, 4, 5 représentent d'autres baguettes de cidaris, et le n° 6 est le *galerites vulgaris*. A l'époque de l'oolithe moyenne apparaissent aussi des insectes: libellules, papillons, abeilles. Les reptiles se montrent toujours.

Oolithe supérieure. — Elle est bien développée en Bourgogne et se trouve aussi en Angleterre. Elle comprend: 1° des marnes caractérisées par l'*ostrea virgula* (huître en forme de virgule), et l'*ammonites cymodoce*; 2° d'autres marnes où l'on trouve une grande ammonite (*ammonites gigas*); c'est cette couche qui, en Angleterre, fournit le ciment de Portland; 3° un calcaire jaunâtre à tissu lâche, appelé calcaire vacuolaire (*trigonia gibbosa*); 4° une couche de marnes bleues ne contenant que des coquilles d'eau douce, et par conséquent déposée en eau douce.

Les marsupiaux se montrent comme à la première période de l'oolithe, en même temps que des sauriens, parmi lesquels nous signalerons une sorte de crocodile de grandes dimensions. Dans la carrière de Solenhofen, on a même découvert dans des couches de calcaire lithographique les débris fossiles d'un oiseau.

Au moment où va commencer la période crétacée, voici les parties de la France qui émergeaient des eaux : la Manche, la Sarthe, la Bretagne, la Vendée, les Charentes, le Limousin, le Cantal, les Cévennes, Saint-Étienne, Nevers, le Morvan, Chaumont, Besançon, la Lorraine, les Vosges, le Jura, les Alpes, la Provence orientale et les Pyrénées : les bassins de la Seine, de la Somme, du Rhône de la Gironde et la partie médiane du bassin de la Loire étaient sous les eaux.

3° *Terrain crétacé.* — Le terrain crétacé tire son nom de l'abondance exceptionnelle de carbonate de chaux que l'on y rencontre. Ce carbonate a dû sortir des profondeurs de globe à l'état de bicarbonate, ainsi que nous l'avons déjà dit; ce bicarbonate a pu se réduire en perdant de l'acide carbonique et se déposer chimiquement; mais la plus grande cause de sa production est l'amas énorme des dépouilles calcaires que les animaux de l'époque abandonnaient après leur mort; les couches du terrain crétacé sont donc formées, un grande partie, d'une agrégation de tests et de coquilles de toutes dimensions, parmi lesquels dominent les dimensions microscopiques. Regardez au microscope un fragment de craie, vous le trouverez peuplé de petites ammonites, de zoophytes et de foraminifères excessivement ténus.

Le terrain crétacé se compose de beaucoup d'assises que nous passerons en revue pour la France seulement :

En Provence, on le trouve dans le bassin du sud-ouest, dans le bassin de la Loire et dans le bassin de Paris. Ce dernier est le plus complet, il comprend :

1° L'*étage néocomien*, divisé en trois assises principales, savoir : les argiles de Vassy, mélangées de couches de sable et de marne avec des minerais de fer (*belemnites latus*, *dilatatus*);

Le calcaire à spatangues, qui donne quelques bonnes pierres de taille (*ammonites asper*, *toxaster complanatus*, qui s'appelait autrefois *spatangus*, *perna mulleti*);

Les argiles à plicatules recouvertes d'un banc de sable sans fossiles, (*ostrea aquila*, *ammonites Dufrenoysi*, etc.....).

Le mot néocomien vient de l'ancienne dénomination latine de la ville de Neufchâtel, en Suisse, où le terrain en question est très-développé.

L'étage néocomien n'existe que dans l'est du bassin de Paris et en Provence.

2° Le *Gault*, qui ne se trouve aussi que dans le bassin de Paris et en Provence; sur la falaise de Folkestone, le gault est formé de 40^{m} d'argile noire qui lui donne son nom, en France il renferme des marnes. On le trouve au-dessus des argiles à plicatules, dont il est séparé par un banc de sable, lequel reçoit les eaux pluviales et les laisse pénétrer jusqu'au fond de la cuvette argileuse du bassin de Paris; le gault est la dernière assise que doit traverser à Paris le tube d'un puits artésien pour arriver à la nappe jaillissante (*ammonites splendens*, *inoceramus sulcatus*).

3° La *craie chloritée*, qui se subdivise en quatre assises principales : la gaize, qui est un calcaire argilo-siliceux, très-développé dans la Meuse, et qu'on retrouve à la pointe de la Hève sous la forme d'un calcaire jaunâtre renfermant des fossiles silicifiés (*ammonites falcatus*);

La craie à *turrilites tuberculatus*, que l'on trouve à la Hève et à l'est du bassin de Paris (*pecten asper*, *ostrea conica*, *turrilites tuberculatus*);

La craie de Rouen, que l'on exploite dans des carrières voisines de la ville, et qui est une mauvaise pierre de construction; c'est une craie plus marneuse

que la précédente (*turrilites costatus, scaphites æqualis, ammonites rhotomagensis*) ;

La quatrième assise manque dans le bassin de Paris ; on la trouve dans le bassin de la Loire, elle est formée des sables appelés dans le pays jalais, et qui sont mélangés de quelques couches de marne sableuse, très-riches en fossiles du genre ostrea (*ostrea columba, plicata*, etc.).

Cet étage tire son nom de craie chloritée de l'aspect que présente la troisième et surtout la seconde assise ; elles sont parsemées de petits grains verdâtres.

En Provence, aux trois premières assises de la craie chloritée, correspond le calcaire corallien de Bergons qui est une bonne pierre ; au-dessus on trouve une couche de lignites.

4° La *craie tuffau*, qui se subdivise en deux assises :

La craie à *inoceramus labiatus ;*

La craie marneuse renfermant l'*hippurites cornu vaccinum ;*

Cette assise est très-développée sur la Loire, où elle fournit les pierres dont sont bâtis la plupart des châteaux, c'est le calcaire de Bouré.

Aux environs d'Angoulême, on retrouve la craie tuffau que traverse le tunnel près de cette ville, et dont l'assise supérieure donne une pierre à bâtir qui durcit à l'air.

En Provence, au-dessus de la couche à *inoceramus labiatus*, on trouve le calcaire de Berre.

5° *La craie supérieure*, qui se subdivise en quatre assises : la craie à *micraster cor testudinarium*, que l'on observe à la falaise de Fécamp sous la forme d'une puissante assise de craie blanche ; on la retrouve dans les carrières de Rouen où elle renferme des rognons de silex blonds ;

La craie de Meudon, qu'on trouve près de Paris à Bougival, Marly, Meudon ; c'est une craie blanche au milieu de laquelle on trouve des bancs de silex noirs (*belemnites mucronatus, micraster coranguinum*) ;

Le calcaire de Maëstricht, que l'on trouve à Meudon sous forme d'une craie dure et jaunâtre criblée de tubulures, et qui, à Maëstricht, est un calcaire jaunâtre et tendre, durcissant à l'air (*ostrea frons*) ;

Le calcaire pisolithique existe à Meudon sous une faible couche de 2 mètres environ, supérieure à la craie jaunâtre, dont nous venons de parler, c'est un calcaire blanc, grumelé.

En Provence, la craie supérieure est représentée uniquement par les lignites de la Sainte-Baume et de Fuveau.

Fossiles. — Nous avons cité plusieurs ammonites, plusieurs bélemnites, parmi lesquelles on en distingue de plates (*belemnites latus, dilatatus*), des huîtres, parmi lesquelles l'*ostrea columba* (*fig.* 7, *pl.* 1), l'*inoceramus sulcatus* (*fig.* 8, *pl.* 1), des échinodermes, parmi lesquels les *micraster*, l'*ananchytes ovata* et le *galerites depressus* (*fig.* 30, nos 1 et 2), des polypiers, dont on trouve les espèces les plus variées, des turrilites, parmi lesquels le *turrilites catenatus* (*fig.* 9, *pl.* 1), les turrilites sont des ammonites, dont les spirales ne sont pas dans le même plan, ils sont enroulés de droite à gauche, tandis que la plupart des mollusques à coquille spirale s'enroulent de gauche à droite.

Dans le terrain crétacé inférieur, on trouve quelques oiseaux, des poissons, des reptiles : le plus curieux de ceux-ci est le mégalosaure, grand lézard atteignant jusqu'à 15 mètres de longueur, et qui était carnivore comme le montre sa mâchoire. A côté de lui, et plus grand encore était un autre lézard, l'iguanodon analogue à l'iguane actuel.

Dans le terrain crétacé supérieur, ce qui domine ce sont les polypiers et les coraux, qui devaient former d'immenses récifs au fond des eaux. Les animaux terrestres devaient être très-nombreux, mais on comprend sans peine que les

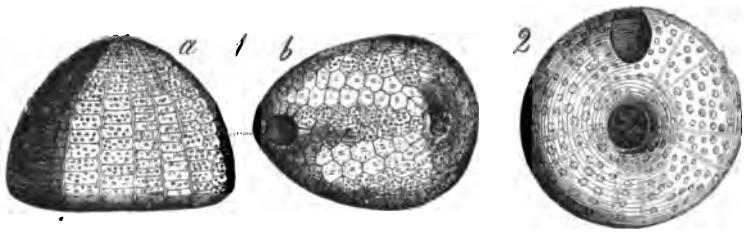


Fig. 30.

dépouilles de ces animaux arrivent bien moins facilement jusqu'à nous que celles des animaux marins. En 1780, on découvrit dans le calcaire de Maëstricht un immense saurien, qui donna lieu à des discussions et même à des disputes violentes entre les savants, c'est le mosasaure, sorte de grand lézard aquatique, dont la tête seule a 2 mètres de long.

TERRAINS TERTIAIRES

Les terrains tertiaires se subdivisent comme il suit, en commençant par la plus ancienne formation :

1° Terrain éocène ;
2° Terrain oligocène ;
3° Terrain miocène ;
4° Terrain pliocène ;
5° Terrain quaternaire qui se continue par la formation actuelle.

Pendant la période tertiaire, les mammifères vont à leur tour régner sur le globe. Dans les mers, on ne trouve plus que des coquilles analogues à celles de notre époque. La vie animale se développe avec une force inconnue jusque-là. Les continents sont plus étendus, et les assises formées en eau douce s'intercalent entre les assises marines.

Les noms donnés aux quatre sous-périodes sont consacrés par l'usage bien que peu clairs et peu corrects. En voici l'étymologie :

Éocène (*eôs*, aurore et *kainos*, récent), oligocène (*oligos*, peu nombreux), miocène (*meion*, moins), pliocène (*pleion*, plus). Ils signifient que l'époque tertiaire est comme l'aurore des temps actuels, et que la vie aux différentes époques ressemble dans une proportion plus ou moins grande à la vie actuelle.

1° *Terrain éocène.* — Il est bien développé dans la vallée de la Seine. A Meudon, au-dessus du calcaire pisolithique, on trouve un conglomérat de galets siliceux enlevés à la craie par les courants aquatiques (*physa*, *cerithium*), puis une couche épaisse d'argile, appelée bonne glaise à la partie inférieure, et fausse glaise à la partie supérieure, parce qu'elle est très-sableuse.

Vient ensuite le calcaire grossier : il commence par des sables parsemés de grains chloritès, qui sont du silicate de fer, et se continue par le banc Saint-Jacques, mauvais calcaire verdâtre (*cerithium giganteum*, *nummulites lævi-*

gata), par le calcaire à milliolites qui est criblé d'une masse de foraminifères appelés milliolites (*cerithium nudum*, etc.); on arrive au calcaire grossier supérieur qui comprend le banc vert, calcaire très-dur (*cerithium lapidum, cerithium cristatum*) ; le calcaire à cérithes qui constitue le banc de roches, le liais, le calcaire à grain fin, qu'on trouve aux environs de Senlis et qui est employé en statuaire, et, enfin, une série de marnes et de mauvais calcaires argileux désignés sous le nom de caillasse (*cyclostoma, limnea, cerithium*).

Les assises précédentes sont très-intéressantes au point de vue des arts de la construction ; nous aurons lieu de les étudier à nouveau dans une autre partie de l'ouvrage. C'est ainsi que le banc Saint-Jacques donne à Saint-Leu une pierre d'un beau grain fin qui durcit à l'air et qu'on a employée au Louvre ; le calcaire à milliolites offre deux assises principales : le vergelé qui est tendre, et au-dessus le banc royal qui est très-dur.

Au-dessus des caillasses, viennent sur une grande épaisseur, des sables siliceux qui, s'ils sont cimentés par un calcaire, fournissent des pavés et de mauvaises pierres de taille. Ces sables présentent quatre grandes assises : les sables jaunes d'Auvers près Pontoise, les sables violacés de Beauchamps, souvent agglutinés par un ciment calcaire et donnant des grès, sables du Guépelle, sables de Mortefontaine.

Après les sables, la mer s'est retirée et l'on trouve une formation d'eau douce, les calcaires de Saint-Ouen.

Vient alors le système du gypse que l'on rencontre à Argenteuil, Triel et qui comprend : 1° des marnes jaunâtres ; 2° une couche épaisse de gypse saccharoïde (3^{me} masse des carriers) ; 3° des marnes ; 4° la seconde masse de gypse parsemée de cristaux en fer de lance ; 5° des marnes ; 6° la première masse de gypse qui est très-épaisse, et qu'on appelle couche des hauts piliers parce qu'en se contractant elle s'est divisée en prismes verticaux ; 7° des calcaires marneux donnant des chaux hydrauliques.

Dans la vallée de l'Oise, le terrain éocène offre des assises différentes. Il comprend : 1° les sables blancs et purs de Rilly qui sont employés à fabriquer les glaces de Saint-Gobain ; 2° les calcaires argileux parsemés de nodules calcaires ; 3° les sables marins de Bracheux ; 4° les marnes à lignites du Soissonnais ; 5° les sables du Soissonnais qu'on remarque à Cuise-la-Motte. Toutes ces assises appartiennent à l'éocène inférieur.

Fossiles. — On connaît plus de 200 espèces dans la flore de l'éocène, sur lesquelles environ 150 dicotylédones. Les insectes, les oiseaux se montrent en très-grand nombre. On trouve des débris de chauves-souris, de reptiles, par exemple l'alligator, et de tortues ; le sable vert du calcaire grossier est parsemé de dents de squale. Les plus curieux de tous ces animaux, sont de grands mammifères de l'ordre des pachydermes, dont les ossements très-nombreux dans le gypse ont fourni à Cuvier l'occasion de ses belles découvertes. Nous citerons le palæotherium qui a la trompe du tapir, une grosse tête, un corps trapu, des jambes courtes terminées par trois doigts qui sortent d'un sabot (*fig.* 10 *pl.* 1), l'anoplotherium qui a des dents de rhinocéros et le pied fourchu des ruminants avec la taille d'un âne (*fig.* 11, *pl.* 1) et une queue très-longue, le xiphodon qui avait la taille et l'allure du chamois.

Parmi les coquilles que nous avons signalées, la figure 12, planche 1, représente un cyclostoma (bouche en cercle), la figure 13, planche 1, une lymnæa, la figure 31, des fusus et des cérithes (n^{os} 5 et 6) et la figure 32 des nummulites, animaux inférieurs foraminifères, dont le test forme des bancs entiers de calcaires.

2° *Terrain oligocène.* — Souvent on ne fait point cette division, parce que le terrain oligocène, très-développé en Allemagne, l'est fort peu en France. Au-

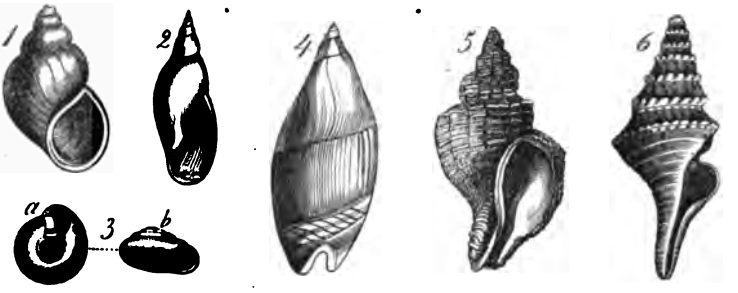


Fig. 31.

dessus du calcaire marneux qui forme la dernière assise du gypse, on rencontre : 1° des marnes vertes ; 2° des marnes jaunes dites marnes à cyrènes ; 3° des calcaires d'eau douce qui se modifient peu à peu et se transforment à la Ferté-sous-Jouarre en meulières précieuses ; 4° des marnes parsemées d'huîtres ; 5° les sables de Fontainebleau, qui se transforment en grès lorsqu'ils sont agglu-

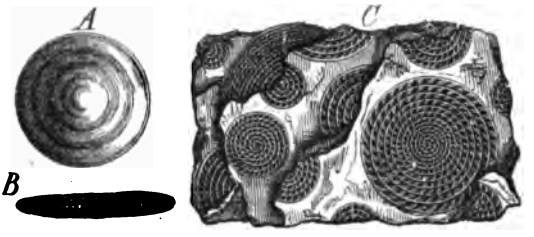


Fig. 32.

tinés tantôt par un ciment siliceux, tantôt et plus rarement par un ciment calcaire ; ces sables, qui ne renferment point de fossiles à Fontainebleau, en montrent un certain nombre aux environs d'Etampes ; 6° les meulières de la Beauce, qui vers Orléans se transforment en calcaires siliceux donnant une excellente pierre de construction dont est bâtie la cathédrale de Chartres.

3° *Terrain miocène.* — Il commence par les sables argileux de la Sologne, qui sont d'une triste stérilité ; viennent ensuite les faluns de la Touraine, formés par un amas de coquilles roulées (cerithium plicatum), que l'on voit encore à Doué près d'Angers. Dans le sud-ouest de la France, le terrain miocène est plus complet. Dans la Gironde et les Landes, on trouve d'abord un sable jaune mélangé d'un falun bleuâtre, puis un calcaire d'eau douce, un falun caractérisé par les genres de coquilles pleurotoma et cancellaria, et un autre falun caractérisé par une cardita.

Dans les Alpes, on trouve encore le terrain miocène formé par des couches alternantes de molasses et de poudingues de 1500 mètres de hauteur. Les Suisses ont donné à cet ensemble le nom de nagelflue.

Fossiles. — Dans le règne végétal, les palmiers voient leurs espèces se multiplier, tandis que les algues, les fougères et les conifères diminuent ; c'est à la puissante végétation arborescente de l'époque que l'on doit les lignites.

Dans le règne animal, nous trouvons des reptiles (grenouilles, couleuvres), des poissons et beaucoup de mammifères (singes, chiens, rongeurs). Nous voyons apparaître dans le terrain miocène le plus grand des mammifères connus, le dinothérium, d'une taille effrayante, supérieure à celle de l'éléphant, dont il se rapproche comme forme ; il était herbivore comme lui ; muni d'une trompe puissante, il avait deux défenses recourbées vers le sol. Le mastodonte plus petit que le dinothérium, se rapproche plus encore de l'éléphant ; il a une trompe et des défenses analogues, avec un corps plus allongé et une seconde paire de petites défenses recourbées vers le bas. A côté de ces animaux, il fallait distinguer encore un singe de grandes dimensions.

4° *Terrain pliocène.*— On le rencontre en Auvergne, dans les Dombes, près de Perpignan, dans la plaine de la Mitidja près d'Alger, près d'Asti en Italie à la suite de la colline de la Superga qui est entièrement formée de conglomérats miocènes.

Près d'Asti, le terrain pliocène se compose de marnes bleues d'une grande épaisseur, surmontées de 60 mètres de sables.

Dans le midi de la France, les faluns de Saubrègues correspondent aux marnes bleues d'Asti et présentent les mêmes fossiles.

Les sables d'Asti sont remarquables par de nombreux débris de mastodontes, d'éléphants et d'hippopotames ; à ces sables correspondent en France les sables de la Limagne et ceux des Landes.

Fossiles. — Dans le règne végétal, on voit se multiplier les représentants de nos forêts d'aujourd'hui, avec beaucoup de conifères, et très-peu de palmiers ou de fougères ; les érables et les chênes sont particulièrement développés.

Les mammifères continuent leur développement : nous retrouvons le mastodonte de la période miocène, avec certaines espèces actuelles, telles que le cheval, le bœuf, le cerf, le chameau.

L'ordre des édentés, grands animaux qui n'ont pas de dents sur le devant et qui se nourrissent de végétaux, est très-developpé ; on y remarque plusieurs animaux ressemblant au tatou.

Le plus curieux parmi ces animaux est le mégathérium, de l'ordre des paresseux, qui vivait sur les arbres et se nourrissait de feuilles, il pouvait aussi fouiller le sol et déterrer des racines ; il était de la taille d'un éléphant, avec des ossements énormes, les vertèbres de la queue atteignent jusqu'à $0^m,60$ de diamètre, et co devait être là une puissante arme offensive ; les pattes de devant avaient plus d'un mètre de long, $0^m,35$ de large et étaient armées de fortes griffes. A côté du mégathérium existaient des espèces analogues et plus petites.

D'énormes troupeaux de bœufs, d'une taille supérieure à celle de l'auroch et semblables aux buffles actuels, parcouraient le terrain pliocène, avec des chevaux, des chameaux, des hippopotames, des tapirs, un cerf énorme dont la tête portait quatre bois.

Signalons aussi parmi les reptiles, des salamandres de plusieurs mètres de longueur (celles de nos jours n'ont guère que $0^m,50$).

Avec le terrain pliocène se termine la période des terrains anciens : la formation quaternaire va commencer, elle se poursuit encore de nos jours. Avant de l'examiner, nous reproduirons ici la description géologique de la France, due à la plume éminente de M. Élie de Beaumont.

DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

« Si l'on examine la carte géologique de la France, on remarque que les diverses formations du terrain jurassique y forment comme une large écharpe qui traverse obliquement la partie centrale de la carte, des environs de Poitiers à ceux de Metz et de Longwy.

Cette écharpe se recourbe d'une part, vers le haut, du côté de Mézières et de Hirson, et de l'autre, vers le bas, du côté de Cahors et de Milhau; mais en même temps il s'en détache deux branches, dont l'une, se repliant au nord-ouest, se dirige sur Alençon et Caen, tandis que l'autre, descendant au midi, suit d'abord la Saône et ensuite le Rhône, depuis Lyon jusqu'au delà de Privas, et tourne autour des Cévennes jusqu'au delà de Montpellier, pour aller rejoindre la première branche dans le département de l'Aveyron.

Ces bandes recourbées, projettent en outre, dans différentes directions, des appendices irréguliers ; mais ce qu'elles présentent de plus remarquable, c'est qu'en faisant abstraction de ces irrégularités et en les réduisant par la pensée à leur plus simple expression, on voit ces bandes former deux espèces de boucles, qui dessinent sur la surface de la France une figure dont la forme générale est celle d'un 8 ouvert par le haut.

Ces assises du calcaire jurassique, qui nous présentent l'immense avantage de pouvoir être poursuivies à découvert, d'une manière sensiblement continue, d'un bout de la France à l'autre, suivant des contours variés qui en touchent presque toutes les parties, se prolongent souterrainement dans des espaces beaucoup plus étendus que ceux où elles forment la surface; mais la manière dont elles s'enfoncent ainsi pour s'étendre par-dessous terre n'est pas la même dans toutes les parties de leur contour apparent.

Si les deux boucles supérieure et inférieure que présente la figure analogue à celle d'un 8, qu'elles dessinent sur la surface, ont entre elles une sorte de correspondance, elles présentent en même temps une opposition complète dans la manière dont les couches jurassiques y sont disposées relativement aux masses qui occupent les deux espaces qu'elles entourent vers le nord et vers le sud : en effet, la boucle inférieure ou méridionale circonscrit un massif proéminent, formé principalement de terrain granitique.

C'est le massif montagneux de la France centrale, couronné par les roches volcaniques du Cantal, du Mont-Dore et du Mézenc. Cette boucle méridionale est ainsi moins élevée que l'espace qu'elle entoure, tandis que la boucle supérieure ou septentrionale, qui forme le contour d'un bassin dont Paris occupe le centre, est en grande partie, plus élevée que le remplissage central de ce bassin. L'intérieur de ce bassin est occupé par une succession d'assises à peu près concentriques, comparables à une série de vases semblables entre eux, qu'on fait entrer l'un dans l'autre pour occuper moins d'espace.

La différence la plus essentielle des deux boucles opposées de notre 8 est que l'une recouvre, et que l'autre supporte les masses minérales qui occupent l'espace qu'elle entoure. La boucle inférieure et méridionale est formée par des couches qui s'appuient sur le bord du massif granitique qui leur sert de centre, et, en quelque sorte, de noyau ; la boucle supérieure et la plus septentrionale est formée au contraire, par des couches qui s'enfoncent de toutes parts sous un remplissage

central auquel elles servent de support, de bassin, de récipient, et dont elles excèdent généralement la hauteur.

La disposition des couches jurassiques, dont nous venons de donner l'indication, est liée de la manière la plus intime à la structure, tant intérieure qu'extérieure, de la plus grande partie du territoire français. Nous pouvons le faire aisément comprendre, en esquissant rapidement les traits par lesquels sa structure extérieure se décèle.

Les deux parties principales du sol de la France, le dôme de l'Auvergne et le bassin de Paris, quoique circulaires l'une et l'autre, présentent, comme on vient de le voir, des structures diamétralement contraires. Dans chacune d'elles, les parties sont coordonnées autour d'un centre ; mais ce centre joue, dans l'une et dans l'autre, un rôle complétement différent.

Ces deux pôles de notre sol, s'ils ne sont pas situés aux deux extrémités d'un même diamètre, exercent en revanche, autour d'eux des influences exactement contraires ; l'un est creux et attractif ; l'autre, en relief, est répulsif.

Le pôle en creux vers lequel tout converge, c'est Paris, centre de population et de civilisation. Le Cantal, placé vers le centre de la partie méridionale, représente assez bien le pôle saillant et répulsif. Tout semble fuir en divergeant de ce centre élevé, qui ne reçoit du ciel qui le surmonte que la neige qui le couvre pendant plusieurs mois de l'année. Il domine tout ce qui l'entoure, et les vallées divergentes versent leurs eaux dans toutes les directions. Les routes s'en échappent en divergeant comme les rivières qui y prennent leurs sources. Il repousse jusqu'à ses habitants, qui, pendant une partie de l'année, émigrent vers des climats moins sévères.

L'un de nos deux pôles est devenu la capitale de la France et du monde civilisé, l'autre est resté un pays pauvre et presque désert.

La structure la plus méridionale des deux parties de territoire que nous venons d'opposer l'une à l'autre se dessine par des traits qui doivent frapper bien plus au premier abord, que ceux de la partie septentrionale, puisque ces traits sont les montagnes les plus élevées de l'intérieur de la France. Cependant, lorsqu'on y regarde de plus près, la structure en forme de bassin de la partie septentrionale se dessine, de son côté, avec une netteté toute particulière, au moins dans sa partie orientale.

La partie orientale est, en effet, celle dans laquelle le contour jurassique du bassin s'élève à la plus grande hauteur. Les différentes assises dont il se compose ont été usées inégalement par les révolutions du globe, et, suivant leurs divers degrés de dureté, elles forment comme une série de moulures concentriques les unes aux autres. Il est arrivé la même chose aux assises, de solidités diverses, qui se trouvent appliquées successivement l'une sur l'autre dans l'intérieur du bassin. De là une série de crêtes saillantes formées par les extrémités des couches les plus solides. Ces crêtes tournent parallèlement les unes aux autres autour de Paris, qui est leur centre commun. Les rivières qui, comme l'Yonne, la Seine, la Marne, l'Aisne, l'Oise, convergent vers le centre du bassin parisien, traversent les crêtes successives dans des défilés que les révolutions du globe ont ouverts pour elles. Ces mêmes crêtes forment les lignes naturelles de défense de notre territoire, et les opérations stratégiques de toutes les armées qui l'ont attaqué ou défendu s'y sont toujours coordonnées par la force même des choses.

Jamais cette vérité n'a été mise plus vivement en lumière que dans la mémorable campagne de 1814.

Sur la crête la plus intérieure formée par le terrain tertiaire ou tout près d'elle, se trouvent les champs de bataille de Montereau, de Nogent, de Sésanne, de Vauchamps, de Montmirail, de Champaubert, d'Épernay, de Craone, de Laon.

Sur la deuxième, formée par la craie, se trouvent Troyes, Brienne, Vitry-le-Français, Sainte-Ménéhould. Là aussi se trouve Valmy !

La troisième crête, beaucoup moins prononcée et plus inégale, présente cependant les défilés de l'Argonne.

Près de la quatrième ligne saillante, qui déjà appartient au terrain jurassique, se trouvent Bar-sur-Seine, Bar-sur-Aube, Bar-le-Duc, Ligny.

Près de la cinquième, qui est également jurassique, sont Châtillon-sur-Seine, Chaumont, Toul, Verdun.

La sixième, déjà un peu excentrique est formée par les coteaux élevés qui dominent Nancy et Metz, et qui s'étendent sans interruption, depuis Langres jusqu'à Longwy, Montmédy, et jusqu'aux environs de Mézières.

Paris est placé au milieu de cette sextuple circonvallation opposée aux incursions de l'Europe, et traversée par les vallées convergentes des rivières principales.

Vers le nord-est, la branche orientale du grand 8 jurassique ne se recourbe que souterrainement et cesse de saillir à la surface. Aussi a-t-on depuis longtemps senti la nécessité de suppléer à l'absence de lignes naturelles de défense, en renforçant, cette partie faible de nos frontières, par une triple rangée de places forces.

Du côté du nord-ouest, la ceinture jurassique s'interrompt ; elle est coupée par les rivages de la Manche qui empiètent sur le bassin septentrional.

A l'ouest et au midi de Paris, les traits principaux de sa forme reparaissent, quoique moins prononcés que vers l'est. On les retrouve, en grande partie, dans la structure intérieure du sol ; mais ils n'ont pas été mis aussi complétement à découvert par les phénomènes géologiques qui ont façonné la surface. Leur influence est, d'ailleurs, contre-balancée par certaines dispositions excentriques. Le calcaire grossier des environs de Paris reparaît près de Rennes, de Mâchecoul et de Bordeaux, ce qui semble faire du bassin de la Gironde un appendice naturel de celui de la Seine. De plus, le grand plateau du terrain tertiaire moyen qui s'étend de la Beauce à la Bretagne et à la Gascogne, semble être une plate-forme naturelle jetée sur tous les accidents intérieurs du sol pour rendre plus faciles les communications du centre parisien avec l'est et le sud-ouest.

On voit donc que l'emplacement de Paris avait été préparé par la nature, et que son rôle politique n'est, pour ainsi dire, qu'une conséquence de sa position. Les principaux cours d'eau de la partie septentrionale de la France convergent vers la contrée qu'il occupe, d'une manière qui nous paraîtrait bizarre si elle nous était moins utile et si nous y étions moins habitués. Enfin la nature, prodigue pour cette même partie de la France, l'a dotée d'un sol fertile et d'excellents matériaux de construction. Environnée de contrées beaucoup moins favorisées, telles que la Champagne, la Sologne, le Perche, elle forme au milieu d'elles comme une oasis. L'instinct qui a dicté à nos ancêtres le nom d'*Ile-de-France*, pour la province dont Paris était la capitale, résume d'une manière assez heureuse les circonstances géologiques de sa position.

Ce n'est donc ni au hasard ni à un caprice de la fortune que Paris doit sa splendeur, et ceux qui se sont étonnés de ne pas trouver la capitale de la France à Bourges, ont montré qu'ils n'avaient étudié que d'une manière superficielle la structure de leur pays. Cette capitale n'a pris naissance et surtout n'a grandi, là

où elle se trouve, que par l'effet de circonstances naturelles résultant, en principe, de la structure intérieure de notre sol. »

TERRAINS QUATERNAIRES — DILUVIUMS ET ALLUVIONS — GLACIERS

Trois grands faits ont signalé la période quaternaire : 1° les déluges de l'Europe ; 2° la période des glaciers ; 3° le déluge asiatique, dont la Bible nous a transmis le récit qu'elle avait recueilli de la tradition.

Les terrains quaternaires sont régulièrement stratifiés ; on les distingue des terrains tertiaires, parce qu'ils sont situés sur le littoral de la mer ou appartiennent à des mers aujourd'hui desséchées, et parce qu'ils ne renferment que des coquilles appartenant aux espèces actuelles.

Les côtes de la Sicile et une grande partie de cette île sont dues à la formation quaternaire ; elle y est composée de deux grandes assises : marnes bleuâtres et calcaires grossiers.

On retrouve cette formation à Malte, en Sardaigne, dans les pampas de l'Amérique du Sud, vastes plaines présentant à la surface une argile rouge qui surmonte des assises de marnes et de tufs, dans le Sahara et les steppes de la Russie.

La côte de Guyenne, en France, nous offre une longue bande de terrain quaternaire dû aux alluvions des fleuves ; les travertins de Naples et de Rome sont de la même période.

Diluviums de l'Europe. — A toutes les époques du globe, il s'est produit des déluges ou grandes débâcles d'énormes masses liquides ; chaque plissement de l'écorce doit nécessairement causer un déluge plus ou moins étendu. L'un des plus terribles a été celui qui suivit l'apparition de la grande chaîne des Alpes ; nous en retrouvons les traces dans les dépôts des vallées du Rhône et de la Durance. Toutes les montagnes, qui constituent le massif des Alpes, ne sont pas venues au jour à la même époque ; il en est résulté plusieurs déluges successifs, dont on reconnaît les traces dans les divers terrains de transport que l'on trouve étagés dans la vallée du Rhône.

Quelle est l'origine de ces masses d'eau ; est-ce une mer intérieure, qui s'est soulevée et déversée ; est-ce à la fonte des glaciers produite par les éruptions des montagnes qu'il faut les attribuer ? Nous n'en savons rien.

Avant le déluge des Alpes s'est produit au nord de l'Europe le grand déluge scandinave, qui a donné naissance au terrain meuble qui forme les plaines de l'Europe septentrionale.

Les traces du grand diluvium alpin sont très-nettes dans les grandes vallées d'érosion qu'il a formées, puis remplies de terrain de transport ; les assises de ces terrains se composent de limons argilo-sableux, renfermant un peu de calcaire et colorés en rouge par des oxydes de fer avec des quantités de cailloux roulés.

Les fossiles de cette époque sont des coquilles et des débris d'animaux semblables aux espèces actuelles. Ces débris se trouvent accumulés et, par suite, faciles à étudier, dans certaines cavités du sol où les courants se sont engouffrés et ont déposé tout ce qu'ils entraînaient ; ces cavités sont connues sous le nom de cavernes à ossements, elles sont peu importantes, en France ; on en trouve cependant dans l'Hérault, près de Lunel, dans les Cévennes, la Franche-Comté, etc.

Quelques personnes ont pensé que les ossements trouvés dans les cavernes appartiennent à des animaux qui se réfugiaient et mouraient là; cette explication est admissible dans une certaine mesure, mais il y a une trop grande masse de débris accumulés pour que ce soit là la seule cause; les courants ont amené la plus grande partie de ces fossiles; d'ailleurs, leur passage est constaté par des stries qui recouvrent les parois primitives de la grotte.

Dans la suite des siècles, ces parois ont disparu sous les stalactites et les stalagmites, et il faut creuser le sol des grottes pour en extraire les ossements enfouis, qui appartiennent surtout aux carnassiers de l'époque (ours, hyène) et à quelques pachydermes (mammouth, rhinocéros).

Période glaciaire. — Pour une cause qui nous est encore inconnue, la vie si développée de la première époque quaternaire fut tout à coup comme anéantie, comme étouffée sous un manteau de glace, qui pendant longtemps recouvrit tout le nord de l'Europe. Les animaux y furent ensevelis, et nous verrons qu'on en a trouvé de parfaitement conservés au milieu des glaces polaires.

Il nous reste encore aujour'hui des glaciers, de l'étude sommaire desquels nous déduirons d'une manière certaine l'existence de la période glaciaire.

Au-dessus d'une certaine altitude, variable suivant les pays et suivant les saisons, les montagnes sont recouvertes de neige; la neige qui tombe sur ces hauteurs est à l'état de grains ou d'aiguilles fortement congelés, et dans une année il s'en forme des couches considérables.

Les rayons solaires fondent la surface, et les gouttes liquides pénètrent dans la masse où, en se congelant de nouveau, elles transforment la neige en glace; les bulles d'air ne sont chassées qu'à la longue, et, pendant longtemps, on a ce qu'on appelle la glace bulleuse, ou névé. Le névé est formé d'assises correspondant chacune à une année et recouvertes d'une couche jaunâtre de sable et de poussière.

A mesure que les assises s'enfoncent, la pression qu'elles subissent augmente de plus en plus, les bulles d'air sont complétement chassées; sous l'influence de la pression, le point de fusion de la glace s'abaisse, il y a abandon d'une petite quantité de chaleur latente qui produit un peu d'eau liquide. Cette eau sert à souder entre eux les divers morceaux de glace qui se réunissent en un seul, ainsi que l'ont prouvé les expériences de M. Tyndall : les couches opaques de névé se transforment en assises bleues de glace.

Tout cela forme une masse énorme d'eau congelée, qui occupe une vallée entière et constitue un glacier.

Un fait bien connu des montagnards et que les naturalistes ont vérifié, est la marche des glaciers qui entraînent avec eux du haut en bas de leur vallée des blocs énormes. On comprend sans peine qu'il est facile par des repères d'avoir la vitesse annuelle du glacier; le glacier se conduit comme un véritable fleuve à faible courant, la vitesse augmente avec la profondeur, et le centre s'avance plus rapidement que les bords.

Le glacier de l'Unteraar, par exemple, avance de 102 mètres par an. Quelle est la cause de mouvement? C'est le phénomène de regélation des morceaux entre eux, dont nous venons de parler plus haut; le morceau supérieur tombe pour venir s'accoler au morceau inférieur; de là naît un mouvement de progression. Sous la pression violente que supporte la glace du fond, il semble qu'elle épouse les profils de la vallée, et qu'elle possède une certaine malléabilité pour franchir les parties reserrées. C'est à l'époque des chaleurs nouvelles

que la marche du glacier s'accélère le plus, et la vitesse augmente moins avec la pente de la vallée qu'avec la masse du glacier.

Dans le mouvement, il se produit aux divers points du glacier des tensions bien différentes, qui se manifestent par des crevasses; ainsi la force d'arrachement, qui se manifeste sur les bords, produit une série de crevasses rectilignes et parallèles inclinées vers l'amont; d'autres crevasses, traversant complétement le glacier, sont dues aux inégalités du fond, par suite desquelles de grandes masses se trouvent en porte à faux; les crevasses longitudinales sont dues à la même cause. Enfin, à l'extrémité inférieure du glacier, on remarque des crevasses rayonnantes dues à la pression de la masse entière. Le glacier est un mode de transport des plus puissants; il recueille à sa surface tous les blocs, pierrailles et boues détachées des rochers par les agents atmosphériques, et les transporte au loin pour les déposer en amas là où la glace vient à fondre.

Ces amas s'appellent moraines, elles sont latérales, médianes ou frontales. Les moraines latérales sont les retranchements qui se forment sur les rives du fleuve de glace, elles atteignent jusqu'à 30 mètres de hauteur. Au confluent de deux glaciers se produit une moraine médiane résultant du concours de deux moraines latérales; enfin, comme le glacier à mesure qu'il descend fond par sa tête qu'il renouvelle sans cesse, il se produit en avant de lui une digue de grandes dimensions, qui constitue la moraine frontale. Quand un glacier a disparu, les moraines n'en subsistent pas moins pour attester son existence.

Qu'un gros bloc soit charrié par le glacier, il arrive jusqu'au bas, et protége de son ombre la glace qui le soutient; celle-ci fond moins vite que la glace voisine, et le bloc reste suspendu sur un pilier en s'inclinant vers le sud comme s'il était attiré par le soleil. Peu à peu, toute la glace disparaît, le bloc tombe et constitue un bloc erratique, nouveau témoin de l'existence des glaciers.

Nous trouvons un troisième témoignage de cette existence dans les stries parallèles burinées sur les rochers par les pointes des cailloux, que les glaces entraînaient avec elles.

C'est en suivant ces traces des glaciers disparus, que l'on a pu dessiner la carte de la période glaciaire, pendant laquelle tout le nord de l'Europe était enseveli sous des glaces toujours en mouvement.

Déluge asiatique. — C'est celui que racontent les Livres saints; il est probable qu'il s'est produit lors de la naissance du mont Ararat. Cette naissance fut accompagnée d'éruptions volcaniques considérables, et composées surtout de matières gazeuses, de vapeurs d'eau qui retombèrent en pluies sur le sol; la trombe s'abattit sur toute la terre habitée, détruisant tout sur son passage.

Le déluge asiatique est le seul dont la tradition ait conservé le souvenir.

Fossiles du terrain quaternaire. — La faune de cette période ne diffère guère de la nôtre; nous nous contenterons de citer les animaux, qui, par quelque trait, se distinguent des animaux de nos jours.

Ces animaux sont le mammouth (*elephas primigenius*), le rhinocéros à narines cloisonnées (*rhinoceros tichorhynus*), l'ours des cavernes, l'hyène et le tigre des cavernes, le bœuf ancien (*bos primigenius*) et le cerf à grand bois.

Le mammouth est un éléphant de plus grande taille que les éléphants de nos jours; armé de longues défenses recourbées, il a le front concave, la tête allongée les jambes courtes, le corps revêtu de poils longs et serrés; avec une crinière flottante; tout cela le différencie de l'espèce actuelle, caractérisée par l'éléphant des Indes. Au moyen âge, les grands ossements du mammouth étonnèrent plus d'une fois les alchimistes et donnèrent lieu à bien des systèmes, que Cuvier réfuta;

il expliqua le premier la provenance de ces ossements si répandus et reconstruisit le mammouth. Plus tard on retrouva le corps tout entier d'un mammouth enseveli et parfaitement conservé dans les glaces de la Sibérie, et l'on put vérifier l'exactitude des théories de Cuvier.

Le rhinocéros tichorynus était aussi couvert de poils, il portait deux cornes sur le nez, et avait les narines séparées en deux par une cloison osseuse ; le rhinocéros des Indes n'a qu'une corne et pas de cloison ; en 1772, Pallas retira des glaces sibériennes le corps entier d'un rhinocéros ancien.

Citons encore l'ours des cavernes, plus grand et plus redoutable que notre ours brun, le tigre gigantesque deux fois long comme le tigre des Indes, le bœuf ancien semblable à l'auroch, mais d'une taille plus élevée et armé de cornes plus grandes, et le cerf à bois gigantesques (*cervus megaceros*).

De l'homme fossile. — De tous les animaux dont on retrouve les ossements dans les terrains quaternaires, le plus intéressant, sans contredit, c'est l'homme.

Jusqu'à ces derniers temps, la chronologie ne faisait remonter l'existence de l'homme que jusqu'à cinq ou six mille ans avant Jésus-Christ.

Depuis 25 ou 30 ans, l'étude et la recherche des fossiles, la paléontologie en un mot a été fondée; on s'est appliqué à reconnaître les divers fossiles des terrains de sédiment, et de cette étude est sortie la conviction que l'homme est antérieur non-seulement au déluge asiatique, mais encore aux déluges de l'Europe.

Qui le prouve? Une grande quantité de faits dont le nombre augmente tous les jours, et que l'on peut résumer en quelques lignes:

1° Au milieu des ossements du mammouth, du rhinocéros tichorhynus, de l'ours des cavernes et autres animaux contemporains, on trouve des ossements humains ensevelis dans la même gangue et déposés par la même cause.

2° Parmi les mêmes ossements on rencontre des produits nombreux et grossiers de l'industrie humaine : des ustensiles communs, des armes en silex, des haches, des dessins grossiers gravés sur l'ivoire et représentant le plus souvent le mammouth ; on trouve encore des débris d'os d'animaux qui ont été brisés par des instruments tranchants pour en extraire la moelle et jusqu'à l'emplacement des foyers marqué par des cendres.

Remarquez que ce ne sont point des faits isolés que l'on cite, les trouvailles de ce genre sont fort nombreuses dans le terrain quaternaire ; plus d'un savant incrédule a voulu tenter l'expérience pour son compte, et s'est vu forcé de se rallier à l'idée de l'ancienneté de l'homme.

On peut affirmer aujourd'hui que l'homme est au moins aussi vieux que le commencement de la période quaternaire.

Tableaux géologiques. — Ici se termine la description des terrains que nous avons résumée autant que possible sans omettre cependant les détails essentiels ; nous avons pensé qu'il serait utile de condenser cette description en quelques tableaux rappelant à la fois la succession des terrains, les roches et les minerais usuels qu'on y rencontre :

SUCCESSION DES TERRAINS AVEC LEURS ASSISES PRINCIPALES.

NOMS DES GROUPES DE TERRAINS GÉOLOGIQUES.	NOMS DES TERRAINS GÉOLOGIQUES.	NOMS DES DIVISIONS OU COUCHES PRINCIPALES.
TERRAIN ANCIEN OU CRISTALLIN.	Terrain ancien ou cristallin.	1° Gneiss. . . . . 2° Micaschistes et talcschistes. } Surmontant le granit
TERRAINS DE TRANSITION OU PALÆOZOIQUES.	Terrain silurien. . .	1° Dalles de Llandeilo (calcaires à ardoises grossières). 2° Grès rouge de Caradoc (oxyde de fer). 3° Calcaire argileux de Wenlock. 4° Calcaire d'Aymestry, entre deux masses d'ardoises.
	Terrain devonien. . .	1° Poudingues et grès quartzeux. 2° Calcaire noir de Givet. 3° Psammites du Condros (schistes et grès micacés).
	Terrain carbonifère. .	1° Calcaire carbonifère. 2° Conglomérats, schistes et grès renfermant les couches de houille.
	Terrain permien. . .	1° Grès rouge (rothe todte liegende). 2° Schistes noirs cuivreux (kupferschiefer). 3° Calcaire noir mélangé de dolomies (zechstein).
TERRAINS SECONDAIRES.	Terrain triasique ou trias.	1° Grès vosgien (rouge). 2° Grès bigarré. 3° Calcaire coquiller, noir (muschelkalk). 4° Marnes irisées.
	TERRAIN JURASSIQUE. — Lias.	1° Lias inférieur (grès quartzeux, calcaire argilifère). 2° Lias moyen (marnes et argiles à rognons calcaires). 3° Lias supérieur (marnes et calcaires argileux).
	OOLITHE. — Oolithe inférieure.	1° Marnes sableuses ou malière. 2° Oolithe inférieure ferrugineuse (calcaire très-dur). 3° Oolithe blanche (calcaire très-dur). 4° Terre à foulon. 5° Grande oolithe (caillasse de Ranville, calcaire, dalle nacrée).
	Oolithe moyenne. .	1° Marnes gris bleuâtre (kelloway-rocks). 2° Marnes noires (argiles d'Oxford). 3° Calcaire corallien (coral rag).
	Oolithe supérieure.	1° Marnes à ostrea virgula. 2° Marnes à ammonites gigas (ciment de portland). 3° Calcaire vacuolaire. 4° Marnes bleues déposées en eau douce (Purbeck).

SUCCESSION DES TERRAINS AVEC LEURS ASSISES PRINCIPALES. (Suite.)

NOMS DES GROUPES DE TERRAINS GÉOLOGIQUES.	NOMS DES TERRAINS GÉOLOGIQUES.		NOMS DES DIVISIONS OU COUCHES PRINCIPALES.
TERRAINS SECONDAIRES. (Suite.)	TERRAIN CRÉTACÉ.	Terrain néocomien. . . .	1° Argiles de Vassy (couches de marnes, minerais de fer). 2° Calcaire à Spatangues. 3° Argiles à plicatules (recouvertes d'un sable sans fossiles).
		Gault.	1° Gault ou argile noire de Folkestone.
		Craie chloritée. .	1° Gaize (calcaire argilo-sableux). 2. Craie à turrilites } Craie chloritée ou parsemée 3° Craie de Rouen. . } de points verts. 4° Sables ou jalais de la Loire.
		Craie tuffau. . . .	1° Craie à inoceramus labiatus. 2° Craie marneuse (calcaire de Bouré).
		Craie supérieure.	1° Craie blanche à micraster cor testudinarium. 2° Craie de Meudon (bancs de silex noirs). 3° Calcaire de Maëstricht. 4° Calcaire pisolithique.
TERRAINS TERTIAIRES.	Terrain éocène. . . .		1° Argile plastique (sables et lignites du soissonnais). 2° Calcaire grossier. { Sables chorités.—Banc Saint-Jacques-Calcaire à miliolites. — Banc vert. — Banc de roche. — Liais. — Caillasses. 3° Sables siliceux (quelquefois cimentés par un calcaire). 4° Gypse (formé d'une alternance de marnes et de gypses).
	Terrain oligocène. .		1° Marnes vertes et marnes à cyrènes. 2° Calcaires d'eau douce et meulières de la Ferté. 3° Sables et grès de Fontainebleau. 4° Meulière de Beauce et calcaire siliceux d'Orléans.
	Terrain miocène. . .		1° Sables argileux de la Sologne. 2° Calcaire d'eau douce et faluns de la Touraine.
	Terrain pliocène. . .		1° Marnes bleues d'Asti.— Faluns de Saubrègues. 2° Sables d'Asti. Sables de la Limagne et des Landes.
TERRAIN QUATERNAIRE.	Terrain quaternaire. .		1° Marnes et tufs des pampas, de la Sicile. 2° Sables des pampas, du Sahara, des Steppes. 3° Terrains de transport des déluges d'Europe. 4° Terrains de transport de la période glaciaire. 5° Terrains de transport du déluge asiatique. 6° Alluvions actuelles.

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION QUE L'ON RENCONTRE DANS LES DIVERS TERRAINS.

DÉSIGNATION DES TERRAINS.	DÉSIGNATION DES MATÉRIAUX.
Terrain primitif.	Granite et roches granitoïdes. — Dans le granite : kaolin de la Garde-Freinet (Var). — Dans le gneiss : Graphite de Sainte-Marie-aux-Mines, Kaolin de Saint-Yrieix.
Terrain silurien.	Ardoises de Fumay, de Rimogne (Ardennes). — Ardoises d'Angers, de Napoléon-Vendée. — Marbres de Caunes, de Campan.
Terrain devonien.	Marbres de Flandre. — Marbre de Givet.
Terrain houiller.	Schistes bitumineux d'Autun. — Phosphate de chaux dans les schistes de l'Allier.
Terrain permien.	Gypse de Russie et de Thuringe.
Terrain du trias.	Gypse et Dolomie de Sarrebourg. — Gypse des montagnes de l'Esterel. — Gypse de Vic et Dieuze.
Terrain jurassique.	Ciment romain de Pouilly. Chaux hydraulique de la vallée de la Meurthe. — Marbre de Montbard. — Marbre noir de Saint-Geniez. — Gypse de Digne et d'Allevard. — Chaux hydraulique de Pouilly. — Ciment romain de Vassy. — Meulière du Cher. — Chaux hydraulique de la porte de France à Grenoble. — Pierre lithographique du Vigan et de Châteauroux. — Marbre brocatelle de Bourgogne, marbre de Beauvais et de l'Argonne. — Pierre lithographique de Bavière. — Marbre de Purbeck.
Terrain crétacé.	Gypse et sables bitumineux de Bastennes (Landes). — Schistes bitumineux de l'Ardèche. — Craie chloritée de Rouen. — Calcaire corallien de Bergons. — Calcaire de Bouré. — Calcaire de l'Echaillon.
Terrain éocène.	Argile plastique. — Calcaire grossier et gypse du bassin de Paris.
Terrain miocène.	Chaux hydraulique du Tarn. — Gypse d'Aix. — Asphalte de Seyssel (Ain).
Terrain pliocène.	Dépôt de coquilles servant d'amendements.

PRINCIPAUX MINERAIS UTILES QUE L'ON RENCONTRE DANS LES TERRAINS SOIT EN COUCHES, SOIT EN FILONS

DÉSIGNATION DES TERRAINS.	DÉSIGNATION DES MINERAIS.
Terrains anciens.	*Dans les granites :* cuivre et étain de Cornouailles; fer hydraté de Framont (Vosges); plomb et argent en Espagne, en Bretagne, à Pont-Gibaud etc... — Dans les gneiss : fer oxydulé de Danemora (Suède) ; cuivre, plomb et argent de Freyberg et de la Forêt-Noire; plomb du Grand-Clôt (Isère). — Dans les schistes : zinc de l'Isère, argent de Bohême, galène argentifère d'Espagne.
Terrains silurien et devonien.	*Minerais :* calamine et galène du Stolberg; calamine de la Vieille-Montagne, fer carbonaté et hématite brune du Canigou, fer oligiste de l'Estramadure. — Anthracites de l'Anjou, de la Sarthe et de la Mayenne. — Filons : Argent d'Huelgoat, mercure d'Almaden, cuivre natif d'Amérique, cuivre de Cornouailles, plomb, cuivre et argent du Hartz, plomb et argent de Poullaouen et d'Huelgoat.
Terrain houiller.	*Minerais :* Anthracite de Bully, paillettes d'or à la base du bassin houiller d'Alais, fer carbonaté de l'Angleterre, de Decazeville et de Miramont. — Houilles et Schistes. — Filons : Bitume du Bas-Rhin.
Terrain permien.	*Minerais :* grès cuivreux de Perm, sel gemme de Russie et de Thuringe. — Filons : fer hydraté de Framont, hématite brune de Wissembourg.
Terrain du trias.	*Minerais :* Fer carbonaté de Soultz, cuivre carbonaté de Chessy, plomb de Bleiberg, zinc et plomb de la Silésie, sel gemme de Vic et de Dieuze, houille sèche des Vosges. — Filons : plomb de l'Argentière, pyrites de fer d'Alais.
Terrain jurassique. . . .	*Minerais :* Houille de Virginie, phosphate de chaux du Calvados, lignites de Vassy, fer de Mondalazac et d'Hayange, pétrole de la porte de France, fer de la Voulte et de Privas, lignites de Criquebœuf, de Boulogne et de Purbeck.
Terrain crétacé.	*Minerais :* Rognons de soufre, fer de Belgique, d'Avesnes, de Saint-Dizier ; argiles réfractaires de l'Ardèche, marnes et phosphates de chaux. — Filons : Cuivre de la province d'Alger, lignites du mas d'Azil, fer oligiste de l'île d'Elbe.
Terrains tertiaires. . . .	*Minerais :* soufre de Sicile, sel gemme de Cardona, lignites du Soissonnais, asphaltes du Gard, fer de la Franche-Comté, sel gemme de Wieliczka, lignites de Cologne, de Lobsann etc..., fer des Landes et d'Italie, asphalte d'Haïti. — Filons : Hydrates d'oxyde de fer de la Moselle, houille de Toscane, cuivres de Ténès et de Mouzaïa (Algérie).

PRINCIPAUX MINERAIS UTILES QUE L'ON RENCONTRE DANS LES TERRAINS SOIT EN COUCHES, SOIT EN FILONS.

DÉSIGNATION DES TERRAINS.	DÉSIGNATION DES MINERAIS.
Terrain quaternaire. . .	Fer phosphoreux de la Moselle et des Ardennes, pouzzolane, soufre, tourbe, or, argent et platine du Rhin, de l'Oural, de Bornéo.
Alluvions modernes. . . .	Or dans le Rhône, le Gardon, le Rhin en Alsace. Tangue et merl de Normandie et Bretagne. — Fer sulfureux et phosphoreux. — Tourbes de la Somme. — Pouzzolanes. — Soufre.

MODIFICATION ACTUELLE DES RIVAGES ET DES COURS D'EAU — ALLUVIONS — DUNES — PLAGES — BARRES — DELTAS

Les cinq phénomènes énumérés ci-dessus sont dus à la même cause : la destruction incessante des roches par les eaux courantes qui entraînent avec elles les débris gros et petits pour les déposer plus ou moins loin suivant leur forme et leur poids. Ces dépôts constituent les alluvions qui tantôt viennent combler des marécages, exhausser des plaines basses et former alors ce qu'on appelle les terrains d'alluvion, tantôt forment des obstacles au cours même des eaux et constituent des plages, des barres et des deltas.

Alluvions. — Les fleuves semblent chargés de renouveler sans cesse la surface des continents, ils tendent à la niveler en écrêtant les montagnes et en exhaussant les vallées ; dans leur cours supérieur, les fleuves ont un lit à pente rapide et possèdent le régime torrentiel, ils entraînent tout sur leur passage, rochers et poussière, ils corrodent leurs rives et tendent à régulariser la pente de leur lit ; c'est là le cours supérieur : vient ensuite le cours moyen, dont la pente est moins forte, le fleuve ne brise plus les obstacles, il les contourne et suit les méandres des vallées, il n'entraîne plus avec lui que les graviers, les sables et les vases ; enfin l'on arrive au cours inférieur dont la pente diminue encore, en même temps que les mouvements de la mer viennent périodiquement lutter contre les eaux douces et s'opposer à leur marche en avant ; arrêtées, celles-ci déposent les sables et les vases, et, comme les eaux de la mer, en arrêtant le fleuve, ont vu leur propre vitesse s'anéantir, elles déposent aussi des masses énormes de particules solides.

Les alluvions fluviales se manifestent bien dans les lacs que traversent de grands fleuves ; tel est le Léman, traversé par le Rhône ; à l'amont, le Rhône en entrant perd de sa vitesse et dépose les matières qu'il entraîne, à la sortie du lac, il prend un accroissement de vitesse et écrête le seuil du déversoir par où il s'écoule ; ces deux phénomènes concourent au même effet, produire la régularisation de la pente du fond. A l'amont, le lac recule sans cesse devant le fleuve ainsi que le constatent l'expérience et l'histoire.

Les fleuves ne détruisent donc que pour reconstruire ; ils enlèvent des rochers grain à grain et du sable ainsi obtenu et vont former dans le cours inférieur des îles mouvantes. Ce qu'ils prennent à une rive convexe ils le rendent à la rive concave.

On est étonné quand on calcule la masse de sables, de vases et de limons que certains fleuves portent avec eux ; c'est à ces matières solides que le Nil et le Pô doivent de fournir des eaux si précieuses pour les irrigations. Chez nous, la rivière torrentielle de la Durance, dont la plus grande partie du débit passe dans les canaux d'irrigation, entraîne avec elle, suivant M. l'ingénieur Hervé-Mangon, 11 millions de mètres cubes ou 18 millions de tonnes de vase par année.

En hydraulique agricole, nous aurons lieu de traiter plus amplement ces questions.

Barres. — Les fleuves présentent à leur embouchure deux phénomènes bien différents : la barre ou le Delta, suivant qu'ils se déversent dans une mer dont les marées ont une amplitude considérable ou dans une mer comme la Méditerranée dont les eaux n'éprouvent qu'une faible oscillation.

La barre est une digue formée par les sables d'alluvions en avant de l'embouchure des fleuves, digue dont le plan est un arc de cercle à convexité tournée vers le large. La barre est mobile suivant la force respective des eaux douces et des eaux salées : en temps de crue, et en vive eau, lorsque la mer s'abaisse le plus, la pente des eaux du fleuve augmente, l'anéantissement de vitesse et par suite le dépôt de la barre se produit plus avant en mer ; mais lorsque la rivière est en étiage, et qu'une grande marée se produit, la barre est repoussée vers le fleuve.

La barre est formée en partie par les alluvions du fleuve ; mais la plus grande partie des sables qui la forment a été apportée par la mer ; l'analyse chimique, l'examen à la loupe des matières déposées l'ont prouvé. Les barres sont pour la navigation de graves obstacles ; nous verrons plus tard quels moyens on emploie pour les combattre.

Deltas. — Lorsqu'un fleuve s'épanche dans une mer sans marée, c'est toujours au même point que la vitesse de ses eaux se trouve annulée ; il se forme donc en ce point une digue fixe qui s'augmente sans cesse. Le fleuve, pour conserver sa pente naturelle, est forcé d'exhausser son lit à l'amont ; peu à peu la digue se transforme en île transversale, les eaux se divisent et passent de chaque côté en formant la figure représentée par le delta grec.

Les deltas du Rhône et du Pô s'avancent en mer de 40 kilomètres, et celui du du Nil de 65 kilomètres.

Le Pô est un des fleuves qui refoulent la mer avec le plus d'énergie.

Ravenne, qui jadis ressemblait à Venise au milieu de ses lagunes, est aujourd'hui au milieu d'une plaine d'alluvions. En 2,000 années, le progrès annuel du delta a été de 17 mètres en moyenne ; le fleuve apporte annuellement plus de 42 millions de mètres cubes de limon, il n'en laisse guère en route parce que partout il est enserré dans des digues qui le forcent à prendre un courant rapide.

Le Rhône est très-actif aussi dans ses alluvions, qui avancent d'environ 16 mètres par année.

Plages. — Tous les promontoires exposés aux courants marins et aux vagues sont corrodés à leur base avec plus ou moins d'énergie, suivant la force des eaux et suivant la nature des roches. C'est ainsi que les falaises de la côte normande continuellement sapées par la base, s'éboulent de temps en temps et reculent dans les terres d'une quantité sensible qui atteint jusqu'à $0^m,25$ et $0^m,30$ par an.

Ces falaises à parois verticales sont précédées d'une plate-forme inclinée, comprise entre les niveaux de haute mer et de basse mer. Elles sont très-tendres et s'attaquent rapidement; il se produit des éboulis considérables qui pourraient jouer le rôle de digue et protéger la falaise, s'il n'existait dans la Manche un courant parallèle au rivage qui entraîne le sable et les cailloux pour en faire des galets. Lorsque ces courants inclinés sur les rivages rencontrent une plage basse, ils ne la respectent point davantage et lui enlèvent des masses considérables de sable; c'est pour cela que les plages du Hanovre et de la Hollande semblent graduellement s'affaisser.

Une plage de sable comprise entre deux promontoires, qui terminent deux chaînes de montagnes, affecte en général une courbure régulière; elle a la forme d'un arc concave vers la mer.

Que deviennent tous ces matériaux arrachés aux côtes? Ils se reportent en d'autres points du littoral, là où les courants ne se font point sentir et viennent produire dans les golfes des bancs de sable et de galets. Les courants inclinés sur le rivage semblent chasser les promontoires devant eux; en effet, ils en corrodent la pointe et déposent les débris un peu plus loin, dans le golfe qui suit, là se reforme la nouvelle pointe du promontoire qui marche ainsi dans le sens du courant.

D'autres fois, les courants chargés de galets sont heurtés par un autre courant, par exemple celui qu'on trouve à l'embouchure des fleuves; les galets se déposent et forment une jetée qui prolonge le rivage. Quelquefois il arrive qu'une île est ainsi réunie à la terre. Les quantités de galets entraînés sont souvent considérables; il en arrive par an 14,000 mètres cubes au Havre, 5,000 à Fécamp, 30,000 à Dieppe; ces galets sont enlevés pour servir au lestage des navires.

Pour terminer ce que nous avons à dire des plages, examinons leur profil transversal; lorsqu'il n'y a point de courant littoral, les vagues viennent frapper normalement le rivage. Chacune d'elles remue, souvent avec grand fracas, la masse de galets et de sables, et les entraîne pêle-mêle; elle s'arrête enfin et revient sur elle-même en partant d'une vitesse nulle, par suite elle ne ramène au loin que les sables et les vases, et laisse les galets se déposer presque immédiatement; les plus gros restent les premiers et marquent la limite extrême des lames, ils sont au sommet d'un talus assez raide qui limite le bourrelet de cailloux; vient ensuite la plage sableuse faiblement inclinée.

Dunes. — Les dunes sont des montagnes de sables que les vents accumulent dans les contrées où s'étendent de vastes plaines sableuses, tels que le Sahara et les autres grands déserts de l'Asie et de l'Afrique. En France, on les trouve particulièrement au-dessus des plages sableuses de l'Océan, sur la côte du golfe de Gascogne. C'est là qu'à la fin du siècle dernier Brémontier les a étudiées et est arrivé à arrêter leurs progrès funestes, en trouvant le moyen de les recouvrir d'une végétation puissante. Pour expliquer la formation des dunes, nous ne pouvons mieux faire que de présenter ici quelques extraits du mémoire de cet éminent ingénieur.

« Les dunes sont des montagnes ou monticules de sables que la mer rejette et que l'on trouve presque partout sur ses bords.

Ces sables, de différentes natures, tiennent nécessairement de celle des diverses matières dont ils sont formés.

On en trouve qui sont purement calcaires sur quelques côtes de Normandie; ils sont mélangés sur celles de Bretagne et de Saintonge, et généralement quartzeux entre l'embouchure de la Gironde et celle de l'Adour.

Les dunes de cette dernière partie du golfe de Gascogne embrassent un espace de 75 lieues carrées ou de 300 milles de superficie.

Cette immense surface, qui pourrait être comparée à celle d'une mer en fureur, dont les flots élevés seraient subitement fixés dans le fort d'une tempête, n'offre aux yeux qu'une blancheur qui les blesse, une perspective monotone, un terrain montueux et nu, et enfin un désert effrayant.

C'est de cette dernière partie surtout qu'il sera dorénavant question dans ce mémoire.

Ces dunes sont plus ou moins élevées et plus ou moins avancées dans les terres, suivant les circonstances qui ont concouru à leur formation et qui en ont retardé ou accéléré la marche, telles que la violence et la direction des vents, la pente plus ou moins rapide du lit de la mer, du rivage et du terrain qu'elles ont envahi, et les différents obstacles qu'elles rencontrent.

La largeur de l'espace qu'elles occupent n'est quelquefois que d'un mille, et quelquefois de 4 ou 5 et plus ; et leur hauteur, réduite quelquefois à 12 pieds, est le plus souvent de 60, de 150 et même davantage.

Elles ne couvrent pas toujours cette vaste étendue : tantôt isolées ou contiguës, tantôt les unes sur les autres, elles sont encore divisées par chaînes, entre lesquelles il se trouve des vallons peu larges, d'une longueur souvent de plusieurs milles sans interruption.

Les dunes restent rarement dans le même état : leur sommet s'élève ou s'abaisse; elles se réunissent ou se séparent ; de nouveaux vallons se forment et d'autres se remplissent ; et tous ces changements ou ce désordre sont l'effet des vents dont elles semblent le jouet.

Toute cette masse énorme marche tout à la fois et elle enterre insensiblement des champs cultivés, des établissements précieux, des villages, des clochers, des forêts entières, et enfin tout ce qui se trouve à sa rencontre, mais sans rien détruire, et pour ainsi dire, sans rien offenser; les feuilles mêmes des arbres changent à peine de position, et leur sommet est encore quelquefois vert au moment où ils sont sur le point de disparaître.

Cet effet, qui doit sembler extraordinaire, est cependant très-naturel. Si l'on faisait tomber par un trou du sablier, dont on se sert pour mesurer le temps, du sable aussi fin que celui des dunes, sur les plantes même les plus délicates et jusqu'à ce qu'elles en fussent surmontées, elles n'en seraient pas sensiblement endommagées ; le sable ne se tasse presque point, et tombant pour ainsi dire grain à grain sur ces plantes, chacune de leurs parties serait soutenue au moment où elle serait sur le point d'en être recouverte.

C'est à peu près de cette manière que les dunes encombrent tout ce qui se trouve sur leur chemin.

Comme ces montagnes ne font que passer, on voit reparaître successivement sur le terrain qu'elles abandonnent, tout ce qu'elles y avaient enseveli ; mais les plantes et les bois tombent en pourriture dès qu'ils commencent à recevoir les impressions de l'air, et l'on ne trouve d'intact ou de bien conservé que les murs des maisons ou de quelques édifices, quand, toutefois, avant leur submersion, on ne les a pas démolis ainsi qu'il est d'usage.

Comme encore les vents sont l'unique mobile de ces sables, comme ce mobile agit irrégulièrement et inégalement en tous sens, il doit produire des irrégularités dans la composition des dunes, dans leur forme et dans leur marche.

Chacun des grains de sable dont elles sont composées, n'est pas assez gros pour résister aux vents d'une certaine force, ni assez petit pour être enlevé

comme de la poussière, ils ne font que rouler sur la surface dont ils sont arrachés, s'élèvent rarement à plus de 3 ou 4 pouces de hauteur, vont souvent avec une très-grande vitesse, et retombent par leur propre poids lorsqu'ils sont à l'abri du vent, ce qui arrive toujours quand ils ont surpassé le sommet de la montagne.

Ainsi, chacun de ces mêmes grains occupe alternativement le centre de la dune, et ils passent tous successivement de la base au sommet, et du sommet à la base.

Il arrive cependant assez souvent, et surtout après les temps de sécheresse, que cette espèce d'ordre dans le mouvement de ces sables est dérangée par les vents d'ouragan et de tempête, qui en enlèvent et transportent au loin des masses considérables à la fois, et c'est à ces sortes d'accidents que l'on doit la formation de ces monticules isolés qui s'étendent toujours en avant et vont désoler le pays et couvrir les campagnes.

A mesure qu'une dune avance, elle perd dans sa marche toujours quelque chose de son volume, dont elle laisse nécessairement des parties dans les cavités et les inégalités du sol qu'elle parcourt; et elle deviendrait insensiblement à rien si elle n'était pas entretenue et fortifiée par de nouvelles matières produites par la même cause et provenant de la même source.

La vitesse de la marche des dunes doit être en raison inverse de leur volume, c'est-à-dire que lorsqu'il est peu considérable, elles doivent avancer plus vite et réciproquement.

Les dunes du centre sont ordinairement les plus élevées: ce sont de véritables chaînes de montagnes, toujours susceptibles d'être accrues par les autres montagnes moins fortes qui les suivent.

Il est généralement reconnu et démontré, même par les progrès des dunes dans les terres, que les vents, dans la partie de l'ouest, soufflent ou plus longtemps ou avec plus de force sur nos côtes, que ceux qui viennent de la partie de l'est, car si, à cet égard, leur activité était égale, ces sables nécessairement n'occuperaient qu'un espace circonscrit, et seraient alternativement poussés et repoussés, soit du côté des terres, soit du côté de la mer. On peut donc mettre en principe que les vents de l'ouest règnent sur nos côtes.

La pente d'une dune, exposée aux vents régnants, est toujours moins rapide que celle du côté opposé; la raison en est toute simple. Lorsque les sables mus sont parvenus au delà du sommet, ils se trouvent abrités et retombent. Ce dernier talus est le plus ordinairement de 50 à 60 degrés, c'est-à-dire à terre coulante et le premier de 10 à 25. Cette règle générale est sans doute dérangée lorsque les vents de la partie de l'est ont accidentellement une certaine durée.

Tous ces sables sont sortis de la mer et continueront de s'en échapper tant que ces vents seront les mêmes. On doit donc présumer que les dunes augmenteront journellement ou d'étendue ou de volume, et que si cette cause ne cessait pas, elles acquerraient par la suite une hauteur aussi considérable que celle de nos plus hautes montagnes; et l'on ne peut révoquer en doute que le riche territoire des environs de Bordeaux, ne puisse être couvert un jour de 300 ou 400 pieds de sable.

Suivant plusieurs remarques qui ont été faites, l'avancement vers l'est de la masse générale de ces sables est d'environ 10 toises par an. Cette ville est précisément à l'est des dunes; elle n'en est aujourd'hui éloignée que de 20 milles; d'où l'on peut conclure que dans à peu près vingt siècles, elle aura éprouvé ou sera sur le point de subir le même sort que les vastes bois de pins de Saint-Julien-de-Lit,

de Lacanau et de la Teste ; celui enfin des bourgs de Vieux-Soulac et de l'ancienne commune de Mimizan, qui ont autrefois existé sur nos côtes.

Ce terme est trop éloigné sans doute pour qu'on puisse prendre quelque inquiétude sur le sort de cette superbe ville ; mais le bourg de la Teste, plusieurs autres bourgs et un grand nombre de villages qui ne sont pas éloignés des dunes, ne peuvent pas exister plus d'un siècle et dans dix années, au plus tard, le clocher de la Nouvelle-Mimizan sera indubitablement enseveli sous les sables.

Les dunes, en s'avançant dans les terres, non-seulement ensevelissent des établissements précieux et des champs en valeur, mais elles obstruent encore de temps en temps les canaux par lesquels les eaux des rivières et des ruisseaux se rendent à la mer.

Ces eaux, alors sans débouché, refluent dans les terres, inondent et désolent les campagnes, jusqu'à ce qu'elles aient pu, par cette force active et continuelle avec laquelle elles luttent sans cesse contre tout obstacle, s'ouvrir d'elles-mêmes un nouveau passage ; effet assez extraordinaire, et que l'on accélère, autant qu'il est possible à force de bras, mais il est arrivé quelquefois que ces passages se sont fermés tout à fait et c'est ce qui a occasionné la formation de ces lacs et de ces marais immenses qui occupent un terrain si vaste derrière ces dunes, depuis la pointe de Grave jusqu'à Saint-Julien-de-Lit. Elles n'ont aujourd'hui d'issue sur une longueur de 60,000 toises, que le bassin d'Arcachon et le boucaut de Mimizan.

Il paraît assez constaté qu'elles avaient autrefois plusieurs autres débouchés et si l'on en croit les habitants du pays, il n'y a pas plus de deux ou trois cents ans que le bassin de Lacanau se déchargeait dans la mer par un canal qu'ils nomment encore le *chenal d'Anchise*, on ne sait pour quelle raison.

Ces débouchés sont plus multipliés entre le chenal de Lit et l'embouchure de l'Adour.

Les dunes restent quelquefois toute une année sans faire de progrès, ou du moins des progrès bien sensibles, mais un fort coup de vent d'ouest répare très-promptement le temps qu'elles semblaient avoir perdu pendant cet intervalle. J'ai vu une montagne avancer de plus de 2 pieds pendant l'espace de trois heures, malgré une pluie assez forte qui devait naturellement en retarder la marche.

C'est dans ces moments de tempête que les dunes sont véritablement intéressantes et dignes de toute l'attention de l'observateur. Des brouillards de sable couvrent absolument leur surface ; les premières couches (celles qui reçoivent immédiatement les impressions de l'air) sont d'abord enlevées, les autres au contraire, en repos depuis plusieurs années, déjà dans une espèce de concrétion (car la nature travaille sans cesse à se réparer), ont acquis une certaine dureté, et opposent une assez forte résistance pour se défendre pendant quelque temps et comme les parties qui les composent ne résistent pas également, comme encore l'action qui tend à leur désunion est elle-même inégale, toute la nouvelle surface de ces sables se trouve remplie d'un nombre infini de trous et hérissée d'une quantité non moins considérable de buttes, toutes de différentes formes.

D'autres accidents ajoutent encore à cette espèce de désordre : des morceaux de bois pourris, des feuilles de goëmon, un brin d'herbe, enfin, y produisent des effets aussi singuliers que bizarres, qu'il serait presque impossible de se figurer si on ne les avait exactement suivis, et qu'on n'eût pas bien étudié les causes qui les ont produits.

Une grande partie de ces buttes ont à leur sommet un corps ou plus tenace, ou

plus pesant, qui, s'il ne l'empêche pas tout à fait, retarde au moins de quelques moments leur destruction.

Toutes ces couches ont des couleurs particulières, d'une teinte plus ou moins foncée, qu'elles paraissent tenir des diverses substances répandues dans l'atmosphère dont elles s'emparent. Elles n'ont généralement que quelques lignes d'épaisseur, sont très-marquées, et aussi faciles à distinguer que celles de nos anciennes terres. Le fer y paraît dominer.

Les fortes pluies occasionnent encore dans les dunes des changements assez sensibles, et mettent dans leurs couches une confusion d'un autre genre.

Il se forme dans les forts talus (ceux à terre coulante) une grande quantité de petits ravins, presque aussitôt remplis que creusés, et l'on en voit descendre des plaques de plusieurs pieds de largeur, et quelquefois de plusieurs toises de hauteur.

L'effet ordinaire de ces pluies est d'arrondir les sommets de ces montagnes et d'augmenter la largeur de leurs bases.

Les vallons qui se trouvent entre les dunes changent de place comme ces montagnes. Leur sol, successivement couvert et découvert, ne produit que quelques espèces de gramen dont les jets traçants et genouillés s'échappent par rayons, forment à chaque nœud de nouvelles racines et de nouvelles plantes qui, par la facilité qu'elles ont de s'étendre et de se propager en tous sens, remplissent en peu de temps le terrain qu'elles peuvent parcourir, et gagnent de vitesse les autres sables qui les poursuivent. Les autres plantes n'ayant pas les mêmes moyens, n'ont pas le temps de s'y reproduire; et c'est par cette raison qu'elles y sont en très-petite quantité.

Après avoir fait la description des dunes, et les avoir suivies dans leur marche, dans leur accroissement et dans leurs effets, nous ne devons pas négliger de parler de quelques dangers auxquels on est exposé en les parcourant, et d'indiquer ce qu'il convient de faire pour les éviter.

Il se forme, au pied de ces montagnes, après des pluies abondantes et d'une certaine durée, de petits lacs ou amas d'eau, quelquefois de plusieurs pieds de profondeur. Nous avons vu que les vents violents enlevaient des parties de sable en les arrachant de la masse pour les transporter au loin. Ces sables retombent en pluie sur la surface de ces lacs ordinairement tranquilles et bien abrités, descendent sans frottement et sans aucun mouvement forcé, restent pour ainsi dire en équilibre au milieu des eaux, et y forment une infinité de petites voûtes; ces voûtes en soutiennent d'autres; celle-ci, d'autres encore, et ainsi de suite; ces dernières s'élèvent souvent à plusieurs pieds au-dessus des eaux. La partie supérieure de ces sables étant alors blanche et sèche, le piége bien recouvert est parfaitement voilé.

Celui qui marche sur cette surface met le désordre dans l'édifice; toutes les voûtes s'écroulent, et il s'enterre quelquefois jusqu'aux reins; mais la frayeur est presque toujours plus grande que le danger. En supposant même qu'il fût possible de s'y enfoncer jusqu'au cou, il serait aisé de s'en tirer, en observant pourtant de ne pas faire d'efforts, ni de trop précipiter ses mouvements, car on pourrait par là contribuer à sa perte. L'équilibre de ces sables dérangé, ils se tassent d'eux-mêmes, et il ne faut que donner le temps à ce tassement de s'opérer. Lorsqu'il est fait, on lève une jambe et on reste quelques instants sans mouvement. Un nouveau tassement se fait sous le pied levé, et le fond devient plus solide. On lève l'autre jambe avec les mêmes précautions, ainsi successivement. et on se trouve peu à peu au-dessus. Alors l'eau qui remplissait le vide de toutes

ces voûtes remonte à la surface et forme une mare de 3 ou 4 pouces de profondeur plus ou moins, dans laquelle on peut marcher en toute assurance. Les vaches, les chiens et les autres animaux qui fréquentent souvent les dunes, et qui par hasard tombent dans ces blouses (c'est ainsi qu'on nomme ces sortes de gouffres), soit par instinct ou par expérience, emploient ce moyen méthodique pour en sortir, toutefois lorsqu'ils n'y sont pas trop profondément engagés et qu'ils conservent au moins la liberté du mouvement des jointures des épaules, autrement ils n'en sortiraient jamais sans secours. »

Causes qui concourent à la formation des dunes. — Quelques naturalistes ont prétendu que les matières qui composent les dunes ne proviennent que des dépôts charriés dans la mer par les eaux des rivières ou des ruisseaux qui s'y réunissent, et que ces matières, rejetées par les flots, en sont le seul aliment.

On ne peut nier que cette faible cause ne soit entrée pour quelque chose dans la formation et l'accroissement de ces sables ; mais il sera aisé de se convaincre de son insuffisance, en jetant un coup d'œil sur la prodigieuse quantité de ceux qui se trouvent entre l'embouchure de la Gironde et celle de l'Adour, et en la comparant avec le vide des vallons creusés par ces deux fleuves, ou par les ruisseaux ou rivières qu'ils reçoivent. Les dunes embrassent une étendue de 120,000 toises de longueur sur au moins 2,500 toises de largeur, et sur une hauteur réduite que l'on croit pouvoir porter, sans erreur, à 54 pieds ou 9 toises. Leur cube total, d'après ces dimensions, doit être actuellement de 2,700,000,000 toises. Si l'on considère maintenant que ces sables sont des corps très-distincts, entiers, non décomposés, anguleux, qui n'éprouvent que peu ou point de fermentation avec les acides, et qui ne sont généralement que des débris ou parties de quartz ; que dans la coupe de ces vallons, au contraire, on ne trouve que des argiles, des glaises, des terres calcaires et végétales ; que les vides faits par les eaux étaient indubitablement remplis de terre de même nature ; que les dépôts de la Gironde et de l'Adour, les deux rivières principales, les seules, pour ainsi dire, qui auraient dû fournir cette énorme masse, sont généralement calcaires, glaiseux et productifs, on jugera que celle dont ces sables ont été extraits a dû être peut-être dix mille fois plus forte que le cube tout entier des dunes, et que, dans la supposition même où il n'en serait que la millième partie, ce qui est évidemment au-dessous du vrai, celui du vide dont ils auraient été extraits devrait être de 2,700,000,000,000 de toises, et formerait une suite de vallons de 84,375 lieues de longueur, sur 96 pieds de profondeur, et de 1,000 toises de largeur réduite.

D'ailleurs, pour prouver que les rivières ne sont pas l'aliment unique de ces sables, transportons-nous un moment sur les bords de la mer; parcourons la côte d'Espagne, depuis le cap d'Ortegal jusqu'à Fontarabie et Bayonne, et celles de France, depuis Ouessant jusqu'à Oléron et Royan, nous y trouverons toutes les matières dont les dunes sont formées ; nous y verrons des plages chargées de gravier, des lits de pierre et de terre plus ou moins saillants, plus ou moins excavés, suivant l'adhérence des matières entre elles, et la résistance de leurs parties · des grottes profondes dans des montagnes coupées à pic et tombant en ruine, des morceaux de roches énormes et de pierres de toute espèce irrégulièrement entassés et nouvellement éboulés ; des ouvrages élevés avec toutes les précautions et toute la solidité dont l'art est susceptible, s'altérer au bout de quelque temps, et éprouver, dans un court intervalle, des dégradations assez sensibles pour n'y plus reconnaître, qu'à peine, la main de l'ouvrier, et les traces de l'art qui les avait élevés.

Ces rochers et ces terres sont continuellement battus, soulevés, froissés les uns contre les autres, et roulés et entraînés par le mouvement constant et toujours actif des eaux de la mer vers le fond du golfe de Gascogne : les quartz, les cailloux, les graviers, en se détruisant eux-mêmes, minent insensiblement et à la longue les masses les plus fortes et les rochers les plus durs. Tous ces débris enfin se décomposent, se broient et s'atténuent sur la plage, jusqu'à ce qu'assez réduits, et pour ainsi dire pulvérisés, ils puissent être enlevés par les vents, jouer un nouveau rôle dans la nature, et y reparaître sous une nouvelle forme.

Moyens qui peuvent être employés pour la fixation des dunes. — Les dévastations occasionnées par les progrès des dunes qui se trouvent dans le golfe de Gascogne, plutôt que les avantages qui pourraient résulter de leur fertilisation, ont seules jusqu'à ce moment excité quelques particuliers, qui y étaient exposés, à tenter divers moyens pour s'en garantir. Les uns, bien convaincus peut-être d'une vérité incontestable, qu'il était inutile de rien entreprendre pour la fixation de ces sables, si l'on n'attaquait d'abord les parties les plus à proximité de la mer, ont jeté au hasard sur ses bords des graines de pin et de gramen, et les ont ensuite abandonnées à elles-mêmes, en confiant leur accroissement à la seule et simple nature.

Mais la plupart de ces graines, en butte à la fureur des vents ou recouvertes par les sables, ont presque toujours été ou déracinées ou ensevelies ; et celles qui ont échappé à ces deux causes de destruction n'ont produit que des plants isolés et qui trop épars pour se défendre réciproquement, languissent pendant plusieurs années et finissent par périr. D'autres sont quelquefois parvenus à arrêter pour quelque temps ces monticules vagabonds échappés à la masse dont nous avons fait mention.

Il faut donc indispensablement, pour garantir tous les établissements menacés de l'invasion par les dunes, non-seulement qu'elles soient entièrement fixées sur toute leur longueur, et depuis leur extrémité du côté des terres jusqu'à leur origine sur les bords de la mer, mais encore se rendre maître des sables préparés et rejetés par cet élément. Ce grand travail, qui doit embrasser une étendue au moins de 350 milles, ou de plus de 75 lieues carrées, ne peut être entrepris que par le gouvernement ; les dépenses que son exécution nécessite sont sans contredit au-dessus des facultés et des forces réunies de tous les propriétaires riverains ; et il faut de plus aux moyens naturels joindre nécessairement les secours de l'art.

Nous sommes intimement convaincu que la fixation absolue et la fertilisation de ces sables ne doivent être ni dispendieuses (en comparant toutefois les dépenses avec les avantages, car on ne pourrait ensemencer une aussi grande quantité de terrain, quelque fertile qu'il fût, sans des frais proportionnés à son étendue), ni difficiles en prenant les précautions nécessaires, et en suivant exactement dans la conduite de cet ouvrage, l'ordre indispensable pour en assurer le succès.

Le premier objet dont il paraît qu'on doive s'occuper, quoiqu'il ne soit peut-être pas précisément essentiel, mais que l'on regarde comme infiniment utile, c'est d'empêcher ces sables de s'échapper de la plage, et de prévenir les dégâts qu'ils pourraient faire dans de jeunes plants sortant de terre, jusqu'à ce qu'ils eussent acquis assez de hauteur pour s'en défendre par leur propre force ; ce qui arriverait toujours après la quatrième ou cinquième année. La quantité de ces sables n'étant que de 5 toises 2 pieds cubes par an et par toise courante, il est bien certain que cette petite quantité régalée sur une surface un peu étendue, ne peut que chausser les pieds des jeunes arbres sans leur nuire. On peut rem-

plir parfaitement ce premier objet de deux manières : la première, et en même temps la moins coûteuse et la plus simple, consistera dans la construction d'un cordon de fascines de 4 ou 5 pieds de hauteur, établi parallèlement à 20 ou 25 toises au delà de la laisse des vives eaux. Ce cordon arrêtera les sables ; et si, ce qu'on ne présume pas, il en était surmonté après deux ou trois ans, il pourrait être aisément exhaussé par un nouveau cordon de pareille hauteur, et même par un troisième s'il devenait nécessaire.

Par la seconde manière on suppléerait à ce cordon au moyen d'un fossé de 12 pieds de largeur sur 6 de profondeur, qui recevrait les sables échappés de la plage jusqu'à ce qu'il fût comblé. Les terres qui en proviendraient opposeraient encore une digue qui retarderait leur évasion ; mais il faudrait pour cela qu'elles eussent assez de consistance pour résister à toute la violence des vents à laquelle elles seraient exposées ; ce fossé, qui serait très-avantageux sans doute, ne pourrait être exécuté généralement partout.

Il se trouve le plus ordinairement, entre le pied des dunes et la laisse des hautes marées, un espace quelquefois de 100 toises, et même souvent plus considérable, dont la surface est plane et presque de niveau, et sur laquelle les sables sortant de la mer glissent, sans s'arrêter, jusqu'à ces montagnes. C'est cette partie qu'il est absolument indispensable de fixer par des semis. Tout travail dans le milieu des dunes ou à leur extrémité du côté des terres, serait tôt ou tard détruit ou mutilé.

Du succès de cette première plantation doit dépendre celui de l'entreprise; lorsqu'on en sera venu à bout, il ne restera, je crois, aucun doute sur la fixation absolue de cet énorme espace de sable.

On propose donc de semer toute cette partie plane et presque de niveau en graine de pins et de genêt ordinaire et épineux, qui y pousseraient d'autant plus vite, et dont la végétation y serait d'autant plus prompte que ce terrain leur est très-favorable. On ne doit donc pas craindre que cette graine soit ensevelie dans les sables et qu'elle ne puisse germer, surtout si on emploie le moyen des cordons pour en protéger la pousse pendant les trois ou quatre premières années. On sait que ce temps est plus que suffisant pour que les graines surtout semées dans un terrain de cette espèce en quantité assez abondante, forment un fourré impénétrable de deux à trois pieds au moins de hauteur; alors notre principal objet sera rempli.

Les nouveaux sables qui sortiront annuellement de la mer, en trop petite quantité pour leur nuire et les surmonter, seront retenues par ces plantations, s'accumuleront à la longue, formeront une nouvelle dune contenue sur ses bords, qui protégera le terrain et les plantations qui se trouveront après elle, non-seulement contre les vents, mais encore contre les efforts de la mer, qu'elle tendra à retenir dans son lit, et dont elle diminuera les progrès sur nos côtes.

Cet effet paraît naturel : la dune fixée sera sapée par sa base, les sables éboulés retomberont alternativement sur la plage et seront reportés au dehors. Cette lutte continuelle, cette opposition renaissante, doit produire un ralentissement d'autant plus sensible dans les irruptions des eaux, que, par la nature quartzeuse de ces sables et leur petitesse, ils résisteront plus longtemps et ne seront pas susceptibles d'être aussi promptement décomposés.

Cette partie ensemencée, depuis le cordon jusqu'au pied des dunes, on doit en regarder la fixation entière comme absolument assurée. On pourrait ensuite, à la rigueur, abandonner tout le reste à la nature, et s'en rapporter à ses soins, lorsqu'on aura levé les obstacles qui s'opposent en ce moment à cette fixation. Les

vents nuisibles, ceux, enfin, qui bouleversent et font mouvoir ces montagnes, viennent de la partie de l'ouest, c'est-à-dire du côté de la mer; cette bande ou cette lisière plantée en pins, abritera l'espace qui se trouve en avant; cet espace sera bientôt lui-même couvert par de jeunes plants qui, à leur tour, en protégeront un autre, et ainsi de suite jusqu'à l'extrémité des dunes. Nulle espèce de terrain n'est plus propre à la production des pins que ces sables; cet arbre s'y reproduit avec une facilité extrême, et les ailes dont ses graines sont armées les portent au loin, quoique sans confusion, en très-grande abondance.

Il ne faut pas cependant se dissimuler que ce travail de la nature serait très-long, et ne pourrait guère être entièrement opéré que dans au moins deux siècles, tandis qu'il peut être accéléré sans peine.

Pour y parvenir plus sûrement et en voir promptement la fin, lorsque ces premiers semis auront été exécutés, et que ces jeunes plants auront acquis une certaine vigueur, c'est-à-dire au bout de cinq ou six années, les plantations doivent être étendues vers les terres et conduites jusqu'au sommet des montagnes.

Cartes géologiques; coupes. — Pour dresser la carte géologique d'une région, il faut parcourir la région tout entière et reconnaître en chaque point le terrain, que l'on trouve immédiatement au-dessous de la couche arable. Les résultats sont rapportés ensuite sur une carte géographique; on trace les lignes de passage d'un terrain à l'autre, et on recouvre la surface occupée par chaque terrain d'une teinte particulière. On conçoit bien quels services peut rendre une pareille carte bien faite; elle est utile à tous, au savant, à l'ingénieur, au constructeur, au mineur et à l'agriculteur. Elle dirige les recherches du savant; elle indique à l'ingénieur chargé d'une route ou d'un chemin de fer les difficultés d'exécution qu'il rencontrera, et elle lui permet presque d'évaluer la dépense; au mineur elle permet de reconnaître s'il y a quelque chance de rencontrer dans un pays déterminé tel ou tel minerai, telle ou telle roche; à l'agriculteur elle permet de déduire de l'aspect géologique la nature de la végétation d'un pays. Il est donc du plus haut intérêt d'obtenir des cartes géologiques aussi détaillées que possible; la carte générale de France a été dressée par MM. Dufresnoy et Élie de Beaumont, tous les jours on la retouche et on la rectifie.

S'il est utile de connaître en plan l'aspect géologique du pays, il sera bien précieux aussi d'avoir les profils que présente le sol, quand on le coupe par des plans verticaux, ce que l'on appelle les coupes géologiques. Elles permettent de suivre dans les entrailles de la terre les diverses formations, d'étudier leur inclinaison, leur position relative, et d'en déduire des résultats importants pour l'industrie et pour la science. Ces coupes géologiques on les obtient en vraie grandeur sur les falaises; les puits de toutes espèces, particulièrement les puits artésiens, les grandes lignes de chemins de fer fournissent en quantité des coupes qu'il serait bon de recueillir et de coordonner. Cette opération a été faite pour la ligne de Paris à Rennes par MM. les ingénieurs Millé et Toré; nous empruntons à leur publication les deux coupes représentées par les figures 1 et 2, planche II.

Nous signalerons une nouvelle carte géologique, donnant à la fois la constitution du sol et du sous-sol, carte imaginée par M. l'ingénieur Delesse; dans chaque terrain, on fait choix d'une couche caractéristique, facile à reconnaître, et de la position de laquelle on peut déduire celle des autres assises du même terrain. Les terrains sont donc représentés par un certain nombre de couches; dans chaque puits, dans chaque carrière, on reconnaît ces couches et on en prend la cote au-dessous d'un plan fixe. On obtient donc une série de points appartenant à chaque couche spéciale, et, par suite, on peut en suivre les ondulations

et même en construire la surface ; au lieu de construire cette surface, on se contente d'en tracer les lignes de niveau obtenues par les plans horizontaux de 10 mètres en 10 mètres, et ces lignes sont tracées de la même couleur que le terrain qu'elles représentent. Ce genre de carte permet de voir à la fois le sol et le sous-sol ; elle résume la carte ordinaire et la coupe géologique, de même que le plan coté résume les résultats donnés par deux plans de projection.

CHAPITRE III

COMPOSITION ET CARACTÈRES DES MINÉRAUX QUI CONSTITUENT LES ROCHES PRINCIPALES

Composition et caractères des minéraux qui constituent les roches principales : chaux carbonatée, dolomie, chaux sulfatée. — Quartz, feldspath, mica, talc, amphibole, pyroxène, argile. — Combustibles minéraux : anthracite, houille, lignite, tourbe.

Classification des minéraux. — On se sert en minéralogie de quatre sortes de caractères, servant à distinguer les minéraux :

1° Caractères extérieurs ;
2° Caractères cristallographiques (forme géométrique) ;
3° Caractères physiques ;
4° Caractères chimiques.

Les caractères extérieurs sont les moins sûrs, car une même substance telle que le calcaire peut se présenter sous plusieurs aspects bien différents.

Ce qu'il y a de constant pour un minéral, c'est la composition chimique et la forme cristalline qui est immuable.

Caractères extérieurs. — Ils sont nombreux, sans être caractéristiques ; voici comment ils sont classés par M. Dufrénoy :

1° *Agrégation.* — Les minéraux sont généralement à l'état solide ; on les dit friables lorsqu'ils s'écrasent entre les doigts ; on en trouve de fluides et de visqueux, comme les bitumes et les huiles minérales.

2° *Couleur.* — Certains minéraux ont une couleur propre caractéristique, tels sont le carbonate de cuivre (vert), le plomb sulfuré (gris bleuâtre), le peroxyde de fer (rouge). Quelquefois la couleur est accidentelle et due à un mélange de plusieurs minéraux ; le marbre noir est un mélange de calcaire et de bitume ou de charbon.

3° *Forme.* — Ce n'est point la forme géométrique, mais l'aspect général. C'est ainsi qu'on dit : fer à grains, quartz en rognons. Il y a aussi des formes pseudo-régulières, qui tiennent à ce qu'une masse échauffée se contracte par refroidissement, elle se fissure régulièrement et forme une série de colonnes à bases régulières : les roches volcaniques présentent cette disposition.

4° *Éclat.* — Il est vitreux, cireux, soyeux, nacré, adamantin, métallique. Un minéral est éclatant, brillant, d'un éclat faible ou mat.

5° *Transparence.* — Les minéraux peuvent être diaphanes (cristal de roche et spath d'Islande), demi diaphanes, translucides comme le verre dépoli (agate et albâtre), translucides sur les bords, ou opaques.

6° *Cassure.* — Elle peut être lamelleuse quand le minéral cristallisé présente

un plan de clivage bien accentué, lamellaire quand les lames sont de petite dimension, c'est-à-dire qu'il y a plus d'un plan de clivage facile, grenue ou saccharoïde comme dans le marbre blanc de Carrare, fibreuse comme dans les minéraux qui cristallisent en prismes allongés (hématite), schisteuse comme dans l'ardoise.

7° *Dureté.* — La dureté est constante pour une même espèce, mais elle peut varier suivant les directions que l'on prend dans un cristal.

On appelle dur un minéral qui n'est pas rayé à la lime ou au couteau, demi-dur celui qui n'est pas rayé par l'ongle, tendre celui que l'ongle peut attaquer.

8° *Ténacité.* — La tenacité est la résistance d'un corps à être cassé. Les minéraux tendres prennent l'empreinte du marteau et sont tenaces; les minéraux durs, tels que la pierre à fusil, se cassent sous le choc et sont fragiles.

9° *Raclure.* — La couleur de la poudre d'un minéral que l'on racle est quelquefois un bon indice.

10° *Tachure.* — Les minéraux tendres peuvent laisser des traces sur du papier.

11° *Onctuosité.* — Le talc, la serpentine sont gras et onctueux au toucher.

12° *Flexibilité.* — Les lames de mica sont très-flexibles et en même temps élastiques, puisqu'elles reviennent à leur position.

13° *Ductilité.*

14° *Saveur.* — En mettant le corps sur la langue, on reconnaît s'il a une saveur amère, douce, salée ou astringente.

15° *Happement à la langue.* — Ce caractère tient à la propriété de certains minéraux d'absorber l'eau.

16° *Odeur.* — Elle se développe par le frottement. Elle peut être bitumineuse, argileuse, sulfureuse.

17° *Froid.* — Le cristal de roche et les pierres fines produisent sur la main une impression de froid que ne donnent ni le verre, ni les pierres artificielles.

18° *Son.* — Quelques roches sont très-sonores (phonolite).

19° *Pesanteur.* — La pesanteur est l'appréciation grossière du poids. La recherche de la densité est un caractère physique.

Caractères cristallographiques. — Nous avons déjà vu en chimie que beaucoup de substances naturelles se présentaient sous des formes géométriques bien définies.

Ces formes sont régies par quelques lois, que nous exposerons brièvement et qui furent en partie données par Haüy en 1784.

Lorsque les minéraux se présentent en masses irrégulières, il arrive souvent qu'en cherchant à les casser, on produit des lames qui par leur ensemble reproduisent toujours le même polyèdre. Les directions des faces de ces lames sont les plans de clivage de la substance et les angles de ces plans entre eux servent à déterminer la forme type de la substance.

Les différents cristaux d'une même substance se déduisent d'une forme type, caractéristique de la substance, par des modifications simples. La forme type est presque toujours le solide formé par les plans de clivage.

Haüy posa les deux lois suivantes :

1° Deux minéraux, qui ont même composition chimique, cristallisent dans le même système et les angles de leur forme primitive sont les mêmes.

2° Deux minéraux, qui n'ont pas même composition chimique, ont une cristallisation différente, et les angles de leur forme primitive ne sont pas les mêmes.

A ces lois il y a des exceptions. Ainsi, nous savons qu'il y a des corps dimorphes, tels que le soufre, c'est-à-dire des corps qui se présentent sous deux

formes cristallines incompatibles. D'un autre côté, l'isormophisme nous apprend que deux substances peuvent avoir à peu près la même forme primitive (exemple des vitriols bleu, vert et blanc).

Des cristaux. — Les cristaux sont des polyèdres à faces planes, presque toujours parallèles deux à deux, et symétriques par rapport à une ligne appelée axe. Un cristal n'a jamais d'angles rentrants.

Les cristaux se brisent suivant certaines directions dites plans de clivage; dans un même minéral, les clivages sont toujours semblablement disposés, les uns par rapport aux autres et aussi par rapport aux faces du cristal.

Il y a généralement trois directions principales de clivages ; ces trois directions forment un solide à angles constants ; ce solide est caractéristique de la substance donnée.

La forme primitive d'un cristal est celle de laquelle on peut par des modifications simples déduire toutes les autres formes cristallines de la substance.

Les formes primitives appartiennent à six grandes classes, qu'on appelle les types ou systèmes cristallins :

Les faces d'un cristal sont toujours symétriques par rapport à un axe : si on connaît trois axes et leur position relative, on aura déterminé la forme générale d'un cristal ; c'est ainsi qu'on obtient les six systèmes suivants :

Axes rectangulaires.	1. Tous trois égaux.	Type : le cube.
	2. Deux seulement égaux . .	Type : le prisme droit à base carrée.
	3. Tous trois inégaux. . . .	Type : prisme droit à base rectangle ou à base losange (rhombe).
Axes obliques. . . .	4. Trois axes égaux et également inclinés les uns sur les autres.	Type : rhomboèdre ou prisme rhomboïdal oblique, dont toutes les faces sont égales.
	5. Deux axes égaux.	Type : prisme rhomboïdal oblique.
	6. Trois angles inégaux. . .	Type : prisme oblique non symétrique.

Étant donnée la forme type d'un cristal, les autres formes s'en déduisent conformément aux lois suivantes :

1° *Loi de symétrie.* — S'il existe une modification sur une partie quelconque d'un cristal, la même modification doit se représenter sur les parties semblables.

2° *Loi d'hémiédrie.* — Dans certains cristaux, il existe une anomalie qui s'explique cependant par la considération de l'hémiédrie : lorsqu'une modification

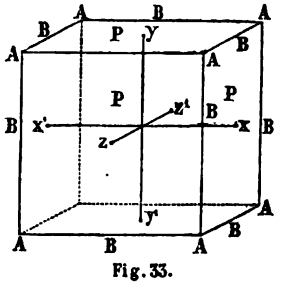


Fig. 33.

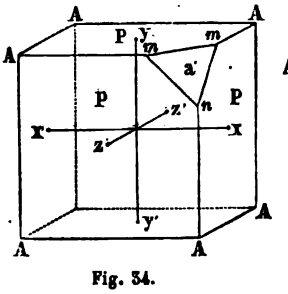


Fig. 34.

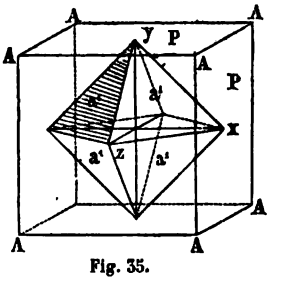


Fig. 35.

existe sur une partie quelconque d'un cristal, elle peut ne se reproduire sur les parties semblables que de deux en deux.

Nous allons montrer sur le premier système cristallin, le cube, les diverses modifications qu'il peut subir :

La figure 33 représente le type cubique avec ses trois axes. On peut en dériver d'autres cristaux, soit en modifiant les angles, soit en modifiant les arêtes; d'autre part, les plans des nouvelles faces peuvent être également inclinés sur les angles ou sur les arêtes modifiées (on dit alors que la modification est tangente), ou avoir des inclinaisons inégales.

La figure 34 montre en (a') une modification tangente sur l'angle; cette modification se reproduit sur les sept autres angles du cube, et si le plan (a') s'avance peu à peu vers l'axe (yy'), on arrive à produire l'octaèdre régulier représenté par la figure 35.

Si l'on fait une modification tangente sur une arête du cube, elle se reproduira d'après la loi de symétrie, sur les douze arêtes, et si le plan de la face (b_1) s'avance peu à peu vers l'axe du cristal, on obtiendra finalement un polyèdre à douze faces parallélogrammes, dont les arêtes sont égales; ce solide est le

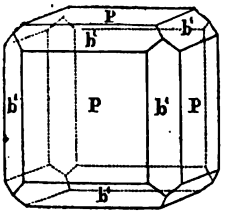


Fig. 36.

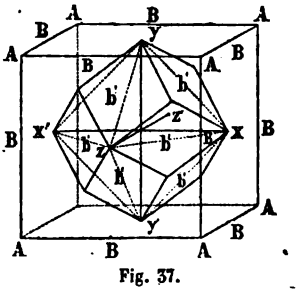


Fig. 37.

dodécaèdre rhomboïdal. Sa formation se comprend bien à l'inspection des figures 36 et 37. Les angles de ce polyèdre ont des valeurs constantes faciles à calculer:

Les angles du parallélogramme des faces sont de 109° 28′ 16″ et 70° 16′ 44″; l'inclinaison de deux faces qui se coupent est de 120°

Nous n'avons pas l'intention d'aller plus loin en cristallographie; nous avons voulu seulement en faire bien comprendre les principes. Nous nous contenterons de donner les figures des cinq derniers types cristallins:

2e système: prisme droit à base carrée (*fig.* 38). Les modifications tangentes sur

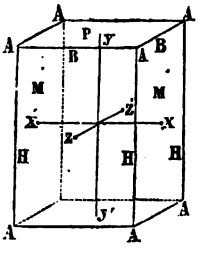


Fig. 38.

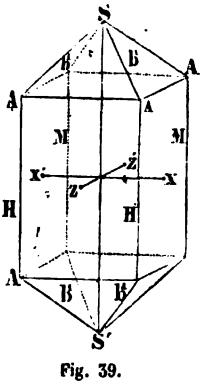


Fig. 39.

les arêtes donnent le prisme à pointement pyramidal que l'on voit figure 39.

Les modifications sur les arêtes verticales donnent le prisme à base carrée (*fig.* 40) ou le prisme à base hexagonale (*fig.* 41).

Le 3e système cristallin a pour type le prisme droit à base rectangulaire (*fig.* 42),

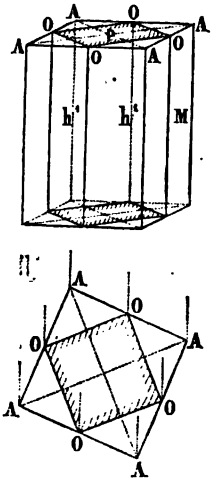


Fig. 40.

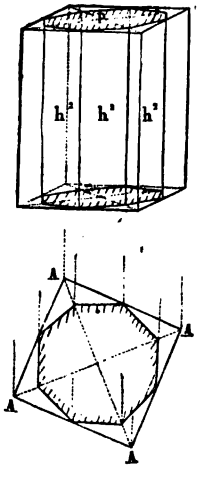
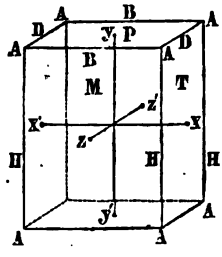


Fig. 41.



Fi 42.

et par modification sur les arêtes verticales, on obtient le prisme rhomboïdal droit de la figure 43.

Le 4e système cristallin a pour type le rhomboèdre (*fig.* 44) dont toutes les faces sont des losanges égaux.

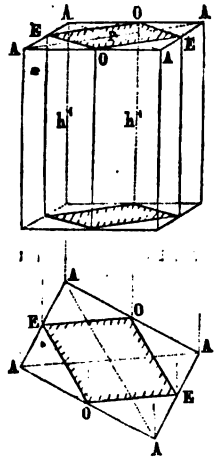


Fig. 43.

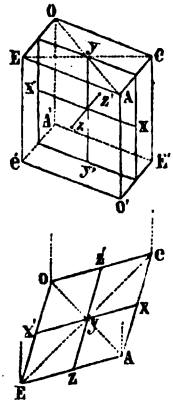


Fig. 44.

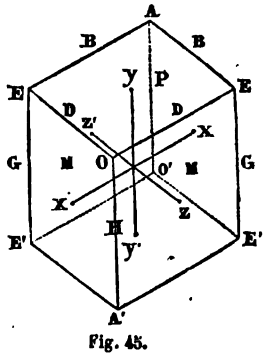


Fig. 45.

Le 5e système a pour type le prisme rhomboïdal oblique (*fig.* 45).

Le 6e système a pour type le prisme oblique non symétrique (*fig.* 46).

Dans la détermination d'un cristal, le point délicat est la détermination des angles dièdres ; on y arrive au moyen d'instruments appelés goniomètres (mesu-

reurs d'angles). Le plus simple est le goniomètre d'Haüy, qui n'est autre qu'un rapporteur ordinaire avec rayons mobiles; ceux dont on se sert aujourd'hui sont plus exacts et sont basés sur les lois de réflexion et de réfraction de la lumière.

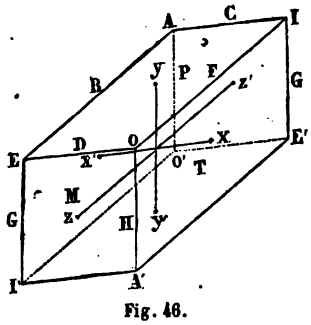


Fig. 46.

Caractères physiques des cristaux. — Ces caractères sont :

1° la densité, que l'on détermine soit par la balance hydrostatique, soit par la méthode du flacon, soit par l'aréomètre de Nicholson (voir la physique) ;

2° L'électricité qu'ils acquièrent par le frottement; c'est ainsi que le soufre prend toujours l'électricité négative ;

3° Le magnétisme ;

4° La double réfraction, propriété par laquelle un faisceau lumineux traversant certains cristaux se divise en deux faisceaux divergents ; il y a donc deux indices de réfraction, et deux espèces de lumières dans le faisceau primitif qui se trouve décomposé.

Nous ne pouvons entrer plus avant dans l'étude de la double réfraction, et de la polarisation. Le mica et le quartz en lames minces présentent ces propriétés ;

5° L'élasticité ;

6° La dilatation, qui, comme l'élasticité est variable, suivant que l'on agit dans la direction de tel ou tel axe du cristal.

Caractères chimiques. — Les caractères chimiques s'obtiennent par des analyses plus ou moins rapides, plus ou moins exactes, que nous ne décrirons pas ; l'essai au chalumeau est fort employé.

Il nous a paru utile de donner les considérations générales que l'on vient de lire, avant d'aborder l'histoire de quelques minéraux qui nous intéressent.

CHAUX CARBONATÉE

La chaux carbonatée pure a, sous ses diverses formes, la composition chimique CaO,Co^2 ; elle se dissout dans l'acide nitrique et fait effervescence avec les acides. Elle est blanche, mais, dans la nature, elle se trouve souvent colorée par un mélange de matières étrangères.

La chaux carbonatée est rayée par une pointe d'acier. Sa densité varie de 2,5 (craie) à 2,7. Au chalumeau, la chaux carbonatée se décompose et donne de la chaux vive.

1° **Spath d'Islande. Chaux carbonatée cristallisée.** — La chaux carbonatée cristalline est quelquefois transparente comme le spath d'Islande ; mais le plus souvent elle est laiteuse. Elle présente trois plans de clivage donnant un rhomboèdre dont l'angle est 105°5′, et que représentent les figures 1 et 2, planche III.

Cette variété se rencontre la plupart du temps en masses cristallines irrégulières, desquelles on peut extraire le solide de clivage, et qui se brisent en lamelles. On dit alors que la chaux est lamelleuse ; si les lames deviennent petites, on dit que la chaux est lamellaire, et enfin l'on passe à la variété saccharoïde.

On rencontre de la chaux carbonatée presque noire, parce qu'elle renferme du

charbon ; on en trouve qui possède une apparence nacrée comme le mica, mais qui se laisse rayer à l'ongle (les Allemands l'appellent écume de mer).

La chaux carbonatée cristallisée se trouve dans des poches ou géodes placées au milieu de terrains calcaires ; elle forme aussi la gaîne ou gangue des filons qui ont été lancés de l'intérieur de la terre dans les terrains calcaires.

Arragonite. — La chaux carbonatée cristallisée est dimorphe ; outre le spath d'Islande qui cristallise en rhomboèdres, on connaît l'arragonite qui cristallise en prisme rectangulaire droit (3e système).

Ce fut le premier corps qui vint contredire la loi d'Haüy ; celui-ci prétendait même que la forme de l'arragonite tenait à la présence d'une certaine quantité de carbonate de strontiane. Mais cette raison est sans valeur, car il y a de l'arragonite qui ne renferme pas de strontiane. Elle se présente en cristaux transparents et en masses fibreuses d'un blanc laiteux. On la rencontre dans les filons de Marienberg en Saxe, et dans les argiles rouges ferrugineuses qui accompagnent le gypse ou pierre à plâtre.

L'arragonite est un des minéraux qui offrent le phénomène de l'hémitropie. Soit un cristal dont MM′ est la section (*fig.* 3, *pl.* III), considérons la ligne *dd′* également inclinée sur les côtés *gg*, et telle que $dl = d^1 l^1$; soit un plan perpendiculaire à la figure et passant par dd^1 ; supposons que l'on fasse tourner la moitié inférieure du cristal de 180° autour de la normale au plan dd^1 on obtiendra la section représentée par la figure 4, planche III, qui présente un angle rentrant en d^1 ; cette section est hémitrope (demi-tour) par rapport à la première. On trouve dans la nature certains cristaux hémitropes avec des angles rentrants ; l'arragonite en est un exemple.

2° **Chaux carbonatée fibreuse.** — La chaux carbonatée fibreuse est formée de longs cristaux prismatiques accolés ; le plus souvent l'apparence cristalline disparaît, les cristaux sont de véritables filaments et la substance prend un aspect soyeux et nacré.

La couleur est laiteuse ; et quelquefois elle varie d'une zone à l'autre ; la chaux carbonatée dans ce cas constitue l'albâtre antique.

Le calcaire fibreux s'est formé par cristallisation au sein des eaux ; nous le voyons encore se former sous nos yeux. Les eaux acidulées dissolvent les carbonates, puis, lorsqu'elles arrivent à l'air, leur acide se dégage et elles ne peuvent plus maintenir le calcaire dissous qui se dépose alors sous forme d'incrustations. Lorsque le suintement de l'eau chargée de calcaire se produit en un point de la voûte d'une caverne, il se forme en ce point une stalactite conique qui s'accroît avec le temps, et juste en regard de la stalactite, sur le sol de la grotte, s'élève une stalagmite qui finit par rejoindre sa sœur placée au-dessus d'elle ; l'ensemble devient alors une colonne brillante.

Le calcaire fibreux est quelquefois coloré en jaune par de l'oxyde de fer, ou en vert par de l'hydrocarbonate de Nickel (permite), ou en rouge par des matières organiques (corail produit par la sécrétion d'animaux qui pullulent dans les mers du tropique).

3° **Chaux carbonatée saccharoïde.** — Son nom indique assez sa forme ; elle a l'apparence grenue du sucre, et cette apparence est due à la cristallisation ; elle laisse passer une partie de la lumière ; elle est aussi dure que les variétés précédentes.

Le calcaire saccharoïde est une roche métamorphique ; on le trouve toujours voisin d'un calcaire ordinaire renfermant les fossiles du lias.

Les deux types de ce calcaire sont : 1° le marbre de Paros et le marbre penté-

lique à gros grains presque lamelleux, et 2° le marbre de Carrare à grain très-fin.

Le calcaire saccharoïde est très-variable d'aspect dans une même carrière, et cela se comprend si l'on considère la cause qui l'a produit: la cristallisation a dû être d'autant moins parfaite que les couches s'éloignaient plus du foyer de chaleur, que ce foyer fût la chaleur souterraine ou la chaleur abandonnée par un filon qui se solidifiait.

4° **Chaux carbonatée compacte.** — La chaux carbonatée compacte est une formation puissante. Mêlée à des couches argileuses, elle constitue le massif du Jura. Sa cassure est esquilleuse ou conchoïde suivant qu'elle est blanche ou colorée; la variété blanche est pure, et sa cassure esquilleuse indique un commencement de cristallisation.

Le calcaire compacte est généralement résistant, surtout s'il est pur; on le trouve coloré en jaune par de l'oxyde de fer, en brun par l'hydrate d'oxyde de fer, en gris par le bitume ou le charbon; quelquefois même il est tout à fait noir, c'est ainsi qu'on le trouve dans le terrain houiller; il prend alors le nom de marbre noir de Belgique ou de Derbyshire.

Le calcaire pur calciné donne de la chaux grasse; lorsque le calcaire est argileux, il donne des chaux maigres et des chaux hydrauliques.

Calcaire oolithique. — Le calcaire oolithique est formé par la réunion d'une masse de petits grains de calcaire compacte, réunis quelquefois par une pâte calcaire; le nom de ce calcaire vient de ce qu'il ressemble à des œufs de poisson accolés les uns aux autres.

L'oolithe est un grain très-petit, et le calcaire a une cassure nette et uniforme; lorsque la grosseur du grain dépasse celle d'un grain de plomb, on a ce qu'on appelle le calcaire pisolithique; le grain y atteint quelquefois une grande dimension, comme dans les dragées de Tivoli, mais, si l'on casse ces noyaux calcaires, on les trouve formés d'une série de couches.

Certains calcaires compactes renferment dans leur pâte une multitude de coquilles fossiles fort bien conservées, qui donnent à la pierre des reflets brillants; cette pierre s'appelle alors la lumachelle et sert à l'ornementation.

5° **Chaux carbonatée terreuse.** — Cette chaux carbonatée est tendre, friable, elle tache les doigts et est presque toujours impure.

La variété pure constitue la craie.

Quand le calcaire terreux renferme plus de 40 pour 100 d'argile, il prend le nom de marne; cette variété est fort employée en agriculture, parce qu'elle se délite à l'air et répand dans le sol la chaux dont les végétaux ont besoin.

Le calcaire terreux se trouve dans les terrains crétacés et dans les terrains tertiaires.

Le calcaire terreux comprend encore l'agaric minéral ou lait de montagne et la farine fossile; ce sont des craies très-friables, d'un grain très-fin et douces au toucher. On s'en sert en Suisse pour blanchir les maisons.

Dolomie. — La dolomie fut longtemps regardée comme une variété de chaux carbonatée renfermant de la magnésie. On le croyait d'autant plus que l'angle du cristal de la dolomie se rapproche beaucoup de celui de la chaux carbonatée (106°15′ au lieu de 105°5′), et ce n'est qu'avec des goniomètres perfectionnés que cette différence est sensible. Le cristal de la dolomie est un rhomboèdre comme celui du spath.

La dolomie est formée d'un atome de chaux carbonatée et d'un atome de magnésie carbonatée ($CaO, Co^2 + MgO, Co^2$); elle se dissout très-lentement dans

les acides, tandis que de la chaux carbonatée qui renferme du carbonate de magnésie seulement à l'état de mélange fait effervescence avec les acides.

On connaît la dolomie cristallisée, saccharoïde, compacte et terreuse; ces variétés se rapprochent des variétés calcaires correspondantes.

La dolomie saccharoïde est souvent friable, parce que les cristaux sont bien formés et, pour ainsi dire, isolés les uns des autres, et peuvent se déplacer facilement.

Les cristaux de dolomie se rencontrent en France à Sainte-Marie-aux-Mines. La dolomie saccharoïde et grenue existe dans les Alpes, par exemple, au Saint-Gothard; elle semble avoir été formée postérieurement aux couches qui la contiennent, par une irruption de carbonate de magnésie venu de l'intérieur; les terrains qui la renferment sont toujours plus ou moins bouleversés. On trouve aux environs de Paris quelques couches de craie à l'état de dolomie.

CHAUX SULFATÉE

La chaux sulfatée est très-tendre, elle se laisse rayer à l'ongle; sa densité est environ 2,3. Insoluble dans les acides, elle est presque toujours blanche; elle abandonne de l'eau par calcination. Sa formule est $CaO, SO^3 + 2HO$. Il en existe plusieurs variétés que nous allons décrire :

1° **Chaux sulfatée cristallisée.** — La chaux sulfatée cristallisée présente un plan de clivage très-facile; avec l'ongle, avec la pointe d'un canif, on en sépare des lames assez longues; elle a deux autres plans de clivage moins commodes à produire. Ces trois clivages donnent pour solide un prisme rectangulaire droit.

Une forme assez commune est celle d'une tablette prismatique dont les faces latérales sont remplacées par deux biseaux (*fig.* 5, *pl.* III); le clivage facile est parallèle à la face *g*.

La chaux sulfatée offre un exemple curieux d'hémitropie (*fig.* 6, *pl.* III), et comme les arêtes d'un cristal hémitrope ont souvent été arrondies, l'ensemble présente la forme d'un fer de lance que l'on voit sur la figure 7, planche III; on trouve beaucoup de ces échantillons dans les carrières à plâtre des environs de Paris.

2° **Chaux sulfatée fibreuse.** — Existe en plaques minces à fibres larges quelquefois contournées. Elle est laiteuse avec une couleur blanche nacrée.

3° **Chaux sulfatée saccharoïde.** — Ce minéral est très-blanc, très-tendre, à cassure grenue, se taille très-facilement; il constitue l'albâtre ordinaire dont on fait des objets d'ornement.

4° **Chaux sulfatée compacte.** — Elle est à cassure esquilleuse, d'un blanc sale, souvent un peu jaune.

La chaux sulfatée se rencontre dans tous les terrains de sédiment, où elle semble avoir été formée par réaction chimique : des pyrites de fer se sont sulfatisées et ont donné du sulfate de chaux en présence des calcaires.

On en trouve des gisements considérables dans les terrains tertiaires et dans les terrains des marnes irisées.

Elle existe aussi, mais en masses accidentelles dans les terrains secondaires; elle a dû prendre naissance dans ces terrains postérieurement à leur formation, et elle est accompagnée de roches porphyriques contemporaines. C'est ainsi que se présente le gypse des Alpes et des Pyrénées.

Le bassin de Paris est très-riche en pierre à plâtre qui offre de nombreux débris fossiles.

Anhydrite. — L'anhydrite diffère de la chaux sulfatée ordinaire en ce qu'elle ne renferme pas d'eau; sa formule est CaO, So^3. Elle a trois clivages faciles qui conduisent à un prisme rectangulaire droit comme solide primitif. Cette substance est plus dure que la chaux carbonatée ; elle est diaphane en lames minces, et translucide en lames épaisses. Elle est ordinairement d'un blanc laiteux, quelquefois grisâtre et même violette ou rose.

L'anhydrite s'altère facilement à l'air et se transforme en chaux sulfatée ordinaire par absorption d'eau.

On la trouve à l'état fibreux dans les mines de sel gemme, par exemple, à Wieliczka en Pologne.

L'anhydrite ne peut servir à la fabrication du plâtre ; c'est une mauvaise pierre de construction. On la rencontre en abondance dans les Alpes.

QUARTZ

Le quartz existe à profusion dans la nature, sous des formes très-diverses : les variétés ne diffèrent que par les propriétés extérieures; elles sont toutes chimiquement composées de silice. C'est un minéral très-dur qui raye le verre et les métaux, et n'est rayé que par le diamant et quelques autres pierres fines. Densité 2,6 à 2,8. Inattaquable par les acides.

En voici les principales variétés :

1° **quartz hyalin ou cristal de roche ;**
2° **quartz compacte ou quartzite ;**
3° quartz agate ;
4° quartz silex ;
5° quartz terreux ;
6° **quartz résinite ;**
7° jaspe ;
8° grès.

1° **Quartz hyalin.** — Sa grande transparence lui a valu son nom ; suivant les cas, on l'appelle cristal de roche, améthyste, caillou d'Alençon ; c'est de la silice pure.

La forme primitive du quartz est un rhomboèdre dont les angles sont 94°15′ et 85° 45′ (*fig.* 8, *pl.* III), mais on trouve rarement des cristaux de cette espèce ; les plus communs sont formés par un prisme hexagonal régulier (*fig.* 9, *pl.* III) surmonté d'un pointement pyramidal à six pans. Quelquefois, deux des faces du prisme hexagonal se développent plus que les autres, et le sommet du pointement est remplacé par une arête (*fig.* 10 *pl.* III) ; enfin, le prisme disparaît quelquefois et le cristal se compose de deux pyramides hexagonales accolées par la base (*fig.* 11, *pl.* III). Cette dernière forme est celle du quartz rouge appelé hyacinthe de Compostelle.

Les cristaux de quartz présentent fréquemment des modifications sur les angles ou sur les arêtes ; la figure 12, planche III, montre un octaèdre de quartz affecté d'une modification hémièdre sur les angles ; la figure 13, planche III, montre une modification hémièdre sur les arêtes des bases, et la figure 14, planche III, une modification complète sur ces mêmes arêtes.

Tous les cristaux de quartz ont un caractère commun : les faces du prisme hexagonal sont recouvertes de stries, que l'on regarde comme les traces géométriques des plans de clivage, c'est-à-dire des plans qui limitent les rangées de petits rhomboèdres formant le gros cristal.

Le quartz présente aussi de nombreux cas d'hémitropies, qui intéressent surtout la science pure.

Contrairement à tous les autres minéraux, le quartz prend souvent de fortes dimensions ; il n'est pas rare de trouver dans les Alpes du Dauphiné, des cristaux de plus de 1 décimètre de hauteur ; et le cristal de roche employé à la confection des verres optiques, est extrait de cristaux que l'on recueille à Madagascar et qui atteignent jusqu'à 3 décimètres.

Le quartz ne présente pas de plan de clivage sensible. Il offre le phénomène de la double réfraction.

Le cristal de roche est blanc ; on rencontre des cristaux de quartz colorés en violet par de l'oxyde de manganèse, et ils constituent l'améthyste ; on le rencontre aussi sous une autre forme très-curieuse, dite quartz enfumé, c'est du cristal de roche coloré en jaune gris par du bitume.

Enfin il y a aussi du quartz rougi par l'oxyde de fer ou bruni par l'hydrate de cet oxyde.

Les cristaux de quartz renferment souvent des cristaux étrangers, par exemple des aiguilles de titane, ou de petites lames de mica qui réfléchissent la lumière ; le cristal prend dans ce dernier cas le nom d'aventurine.

Enfin, un spectacle curieux est celui de certains cristaux de quartz qui renferment des cavités intérieures remplies d'un liquide oléagineux ; cela se rencontre surtout dans les cristaux enfumés et doit tenir à la présence de matières bitumineuses au moment de la formation du quartz.

2° **Quartz compacte ou quartzite.** — On le trouve dans les terrains de transition des Alpes et de Bretagne ; il a dû se former par sédiment, car il est composé de grains de quartz souvent peu apparents, reliés par une pâte siliceuse.

3° **Quartz agate.** — L'agate se trouve au milieu de terrains anciens, sous forme de rognons ou masses globuleuses ; ce quartz est d'une date postérieure à celle des terrains ; il s'est déposé dans des poches par couches concentriques successives, qu'il est facile de reconnaître en sciant un rognon d'agate.

Le liquide tenant la silice en suspension arrivait dans la poche par des fissures dont on retrouve la trace.

Tout le monde a entendu parler des geysers d'Irlande, qui lancent d'une manière intermittente des jets d'eau chaude, laquelle en retombant abandonne de la silice ; cette silice est sous forme de quartz agate.

L'agate ordinaire est formée de bandes concentriques, de couleurs variées ; on l'appelle agate rubannée.

Lorsque les rubans sont alternativement noirs ou blancs, l'agate s'appelle onyx et sert à faire les camées.

La sardonyx est une agate à couches alternativement blanches et rouges.

Les agates, grises, bleuâtres, de couleur claire en général, s'appellent calcédoines ; les agates rouges et foncées sont des cornalines.

La saphirine est translucide bleu de ciel ; l'héliotrope, vert foncé avec points rouges ; les œils de chat sont des agates rubannées dont les rubans sont circulaires.

4° **Quartz silex.** — Le quartz silex se présente en rognons plus ou moins gros, tout bosselés et quelquefois réunis les uns aux autres par des branches ; on les trouve dans la craie, aussi sont-ils blancs à la surface.

A l'intérieur, ils sont noirs ou gris, quelquefois jaunes. Les fragments en sont très-aigus et constituent la pierre à fusil ; le fer choqué contre eux abandonne de petits fragments qui, portés à une haute température, s'oxydent en produisant la température rouge. Le silex est sans éclat, légèrement transparent.

A côté de la pierre à fusil, il faut placer la meulière, qui est un silex tout rempli de crevasses et de boursouflures intérieures ; il semble que ces pierres aient pris naissance dans un liquide bouillonnant.

Les cavités sont plus ou moins étendues; elles sont souvent tapissées de cristaux ; la meulière est une pierre dure et résistante ; la meilleure est celle dans laquelle les cavités sont de dimensions moyennes et sensiblement uniformes. La meulière employée dans les moulins doit être d'un grain uniforme, assez fin pour que le blé ne se loge pas dans les cavités.

5° **Quartz terreux.** — Les rognons de quartz silex sont recouverts en général d'une couche blanchâtre qui est de la silice pure ; la masse est très-tendre et s'écrase entre les doigts. Le quartz terreux est dû à des infiltrations siliceuses ; il est la base des poussières appelées tripoli, dont les grains très-durs servent à polir les métaux.

6° **Quartz résinite.** — C'est un quartz luisant, analogue à la résine.

Le quartz résinite est brun ou vert, quelquefois blanc laiteux, avec des reflets irisés, et alors il constitue l'opale. Il y a des opales d'un rouge vif que l'on trouve au Mexique.

L'aspect particulier du quartz résinite tient à ce que, contrairement aux précédents, il n'est pas formé de silice pure, mais qu'il renferme de la silice avec environ 10 pour 100 d'eau.

L'hydrophane est un quartz résinite très-capillaire qui, plongé dans l'eau, s'en imbibe et devient transparent ; on voit des bulles d'air se dégager pendant l'imbibition. L'hydrophane est jaune.

7° **Jaspe.** — Le jaspe est complètement opaque. C'est un silex mélangé, soit d'oxyde de fer, soit d'hydrate de cet oxyde; il est à cassure unie, et présente quelquefois une série de couches concentriques.

Dans les jaspes, il faut compter la pierre de touche, silex noir que l'on trouve en Lydie et sur lequel les métaux précieux laissent par le frottement une trace que l'on essaye à l'acide nitrique.

8° **Grès.** — Le grès est une roche composée, arénacée, formée de grains de quartz hyalin réunis par un ciment. Le ciment est tantôt calcaire, tantôt siliceux, et alors le pavé est plus résistant. Le grès est aussi dur que le quartz, mais la ténacité dépend beaucoup du ciment, de sa quantité et de sa nature.

On rencontre parfois des grès colorés en brun ou en rouge par du fer.

FELDSPATH

Le feldspath comprend une famille de minéraux de structure analogue.

Les roches plutoniennes, les granites par exemple, sont formées en grande partie de feldspath en lamelles nacrées blanches ou faiblement colorées. Longtemps on a cru que le feldspath était un silicate double d'alumine et de potasse; on reconnut ensuite que la potasse pouvait y être remplacée par la soude, et aussi par les bases terreuses (fer, chaux, magnésie).

Voici les espèces principales de feldspath :

1° feldspath orthose : $KO,SiO^3 + Al^2O^3,3SiO^3$.
2° feldspath orthose vitreux : $(K,Na)O,SiO^3 + Al^2O^3,3SiO^3$.
3° albite : $(NaO,SiO^3 + Al^2O^3,3SiO^3)$.
4° oligoclase : $(Na,K,Ca)O,SiO^3 + Al^2O^3,2SiO^3$.
5° Labrador : $(Ca,Na)O,SiO^3 + Al^2O^3,SiO^3$.

Enfin il y a des feldspaths, tels que le pétalite et le triphane, analogues à l'orthose et qui n'en diffèrent qu'en ce que la potasse est remplacée par de la lithine. Ils sont peu répandus et nous n'en parlerons pas davantage.

On remarquera que dans les feldspaths orthose, orthose vitreux et albite, les quantités d'oxygène, des oxydes métalliques, de l'alumine et de la silice sont entre elles comme les nombres 1, 3, 12, tandis que dans l'oligoclase ces mêmes quantités sont comme 1, 3, 9, et dans le labrador comme 1, 3, 6.

1° **Orthose.** — L'orthose se trouve en cristaux blancs dans la pâte des roches anciennes, ou bien encore en cristaux séparés tapissant des géodes, ou enfin en masses lamelleuses.

La forme primitive de l'orthose est le prisme rhomboïdal oblique. Il est en général de couleur blanche. Il est dur et raye le verre.

On en trouve difficilement des cristaux isolés, et la forme primitive est rare, elle est représentée par la figure 15, planche III; modifiée, elle donne des prismes de forme variable. On trouve même des cristaux hémitropes.

La figure 16, planche III, donne un cristal d'orthose avec modification sur deux angles symétriques ; la figure 17, planche III, représente un cristal sur lequel il existe deux faces tangentes à la place de deux des quatre arêtes qui limitent verticalement les faces M, et deux biseaux à la place des bases (*a*).

Il existe un feldspath lamelleux, sous forme de filons dans les granites et les porphyres ; ce feldspath est blanc laiteux ou rose, couleur assez fréquente chez le feldspath. Ces lames de feldspath ont quelquefois un aspect nacré ou irisé.

Il existe une grande quantité de variétés du feldspath orthose ; nous ne pouvons les signaler ici ; elles ont même composition chimique et se distinguent par des détails de forme et de couleur.

On trouve, au voisinage du feldspath cristallisé, une poudre blanche terreuse qui résulte de l'altération du feldspath ; ce qui le prouve, c'est que, dans des masses de ce genre, on a retrouvé certaines parties conservant la forme des cristaux. En se décomposant, le feldspath a perdu son alcali, et la terre blanche est du silicate d'alumine, c'est-à-dire du kaolin, base de la porcelaine.

Le feldspath compacte, ou pétrosilex (*hornstein* des Allemands), se rencontre dans le massif des Vosges. C'est un minéral qui a les caractères suivants : il est difficilement fusible et donne un émail blanc, il raye le verre, et offre une cassure esquilleuse. Le pétrosilex se rapproche du quartz compacte qui, lui, est infusible ; il est à bords translucides et possède l'aspect des corps gras. Ses couleurs sont variées : tantôt gris rougeâtre ou verdâtre, tantôt gris plus ou moins blanchâtre, quelquefois rouge sang. La densité moyenne des pétrosilex est 2,6.

Les pétrosilex ont même composition chimique que les feldspaths ; toutefois la proportion de silice y est plus forte, et celle de protoxyde plus faible.

Le pétrosilex se trouve en masses dans les terrains de granite ; on le trouve aussi dans les terrains de transition, soit sous forme de filons, soit sous forme de couches réellement sédimentaires (pierre de Chalonnes, sur la Loire).

Une autre variété de feldspath est le feldspath sonore ou phonolithe, qui ressemble au pétrosilex, mais s'en distingue par sa plus grande fusibilité ; il donne un émail gris. Les phonolithes sont moins durs que le feldspath et se laissent rayer par l'acier ; d'une couleur gris verdâtre qui blanchit à l'air, ils ont quelquefois une constitution schisteuse et peuvent se débiter en lames, telle est la roche tuilière du Mont-Dore.

On connaît aussi un feldspath résinite, à éclat gras, qui se boursoufle par la fusion et donne un émail blanc ; ce feldspath est de couleur vert bouteille.

2° **Feldspath orthose, vitreux.** — L'obsidienne est une roche analogue au feldspath résinite, mais qui en diffère en ce qu'elle a l'aspect vitreux au lieu de l'aspect résineux ; l'obsidienne a une cassure conchoïde, vitreuse, éclatante ; elle ressemble tout à fait à un émail. Et, en effet, c'est un émail qui a été produit par la chaleur dégagée au moment de l'éruption des roches plutoniennes. Les obsidiennes sont noires ou vert foncé ; par la fusion, elles se boursouflent et donnent un verre rempli de bulles.

Quelques obsidiennes, dites à œil de perdrix, renferment des noyaux cristallisés qui se détachent d'une façon brillante sur le fond noir.

L'obsidienne se rencontre dans les terrains volcaniques, c'est ce qui explique sa formation ; elle se présente en coulées assez puissantes pour former quelquefois de véritables montagnes.

La pierre ponce, que tout le monde connaît, cette masse boursouflée, formée de fibres verdâtres entre-croisées, est une modification de l'obsidienne. L'obsidienne en fusion a été traversée par un courant gazeux froid qui l'a boursouflée et solidifiée. La ponce est généralement gris verdâtre, c'est une pierre dure qui raye l'acier, fort rude au toucher, elle se brise facilement ; sa densité est voisine de celle de l'eau, un peu moindre cependant. Par la fusion, elle donne un émail blanc. Dans certains blocs, on peut saisir le passage progressif de l'obsidienne à la ponce ; on rencontre près de Naples des tufs ponceux disposés en couches, ils ont été formés par des courants qui avaient désagrégé les ponces volcaniques anciennes.

3° **Albite.** — L'albite se rencontre en cristaux, en lamelles, et en masses grenues. Éclat vitreux. Couleur ordinaire : blanc de lait. L'albite est translucide, aussi dure que le feldspath. Densité 2, 6.

La forme primitive de l'albite est un prisme oblique non symétrique (*fig.* 18, *pl.* III) ; ses cristaux sont souvent hémitropes, et presque toujours striés à cause des traces que font sur les faces les plans de clivage.

L'albite est un silicate double à base de soude ; mais un peu de soude peut être remplacé par de la potasse sans changer la constitution du minéral, de même que nous avons vu dans l'orthose vitreux un peu de soude se substituer à la potasse.

L'albite lamelleuse ce confond avec le feldspath lamelleux ; l'albite grenue est blanche et saccharoïde.

L'albite terreuse existe et engendre du kaolin en abandonnant la soude, comme le feldspath en engendre en abandonnant la potasse.

L'albite se trouve en filons dans les Alpes et en cristaux dans le granite, où souvent on est exposé à prendre l'albite pour l'oligoclase et inversement. L'albite en cristaux se trouve surtout dans les granites relativement modernes, tels que ceux du centre de la France, par exemple du Forez.

Les porphyres et les diorites sont des roches renfermant de l'albite.

4° **Oligoclase.** — L'oligoclase entre bien plus fréquemment que l'albite dans la constitution de roches importantes, telles que le granite, le gneiss et le schiste micacé.

On la trouve rarement en cristaux bien déterminés ; les quelques échantillons que l'on en possède sont identiques à ceux de l'albite.

L'oligoclase se présente en masses lamelleuses, analogues à celles de l'orthose ; ces deux minéraux sont souvent mélangés.

La couleur générale de l'oligoclase est le gris, avec une teinte jaunâtre. Il en

existe une variété rouge de cuivre, qu'on appelle pierre du soleil. Densité 2,65. Même dureté que l'orthose.

Certaines variétés d'oligoclase renferment, outre la potasse, la soude et la chaux, de la magnésie qui se joint aux protoxydes précédents ; l'alumine Al^2O^3 est quelquefois en partie remplacée par du peroxyde de fer Fe^2O^3.

L'oligoclase se trouve surtout dans les granites, spécialement en Suède et en Norwège, où elle joue le même rôle que l'orthose. On la rencontre aussi dans certains granites de Bretagne et du centre de la France ; ces granites sont à gros grains, et d'origine postérieure à celle des granites à orthose qui sont à plus petits grains.

Dans beaucoup de granites, l'orthose et l'oligoclase sont coexistants.

5° **Labrador.** — Le labrador a été reconnu pour la première fois dans une belle roche appelée pierre de Labrador, et longtemps on l'a confondu avec l'albite. — Le labrador se présente en masses lamelleuses d'un gris cendré ; dans certaines pierres très-brillantes, le labrador prend des reflets de couleur variée.

Le balsate et les laves renferment souvent de nombreux cristaux très-petits de labrador ; les laves de l'Etna en sont parsemées, et quand ces laves sont désagrégées, on peut recueillir les cristaux.

Les cristaux bien nettement conformés se rencontrent très-rarement. La forme primitive du labrador est un prisme oblique non symétrique.

Le labrador est attaquable par l'acide chlorhydrique, tandis que l'albite ne l'est pas ; c'est là ce qui les distingue. Le labrador raye le verre ; sa densité est 2,7 ; il fond avec beaucoup de difficulté au chalumeau.

Les cristaux de labrador qu'on trouve dans les laves sont blancs ou gris, dans les diorites ils sont verdâtres.

Le labrador est un silicate double d'alumine et de chaux mélangée à de la soude ; la chaux domine, ce qui explique la difficile fusibilité de ce minéral ; à ces protoxydes se mélange quelquefois un peu d'oxyde de fer.

On trouve le labrador dans des roches analogues aux granites, mais qui s'en distinguent par l'absence de quartz. Le labrador renferme peu de silice, et n'entre en général que dans la composition des roches basiques, telles que les diorites, les basaltes et les laves.

MICA

Le mica est un des minéraux les plus faciles à reconnaître : il est en lamelles plus ou moins épaisses, dont le clivage parallèlement à la base est très-commode ; avec un couteau, avec l'ongle, on en détache de petites feuilles transparentes de quelques millimètres d'épaisseur. Le mica est très-flexible et en même temps élastique ; les feuilles repliées sur elles-mêmes reviennent ensuite à leur forme plate.

Le mica possède un éclat métallique très-vif ; il affecte diverses couleurs, ordinairement il est blanc argentin, ou noir verdâtre.

Les micas présentent des propriétés variées au point de vue de la fusibilité ; cela tient à des compositions chimiques différentes, et il est convenable de considérer le mica non comme un individu, mais comme une famille, dont la propriété générale est de se diviser en lamelles transparentes et brillantes (mica vient de *micare*, briller).

Sous le rapport de la réfraction de la lumière, les micas présentent aussi des propriétés très-variables.

Au point de vue chimique, les principes dominants du mica sont: la silice, l'alumine, avec la magnésie, la potasse et la lithine; à ces éléments s'ajoutent en moindre proportion les protoxydes de fer et de manganèse et quelquefois du fluor ou de l'eau.

Dans certains micas, la potasse est seule sans la lithine; ceux dans lesquels entre la lithine ont en général des formes moins régulières. En somme, la classification des micas sous le rapport chimique n'est pas complète.

Le mica n'existe qu'à l'état cristallin; mais les cristaux nets sont rares. Nous avons dit que la forme primitive était un prisme rhomboïdal droit sous l'angle de 120°; on rencontre souvent le mica sous la forme de prismes à six faces très-aplatis (*fig.* 19, *pl.* III) et formant de petites tablettes. Souvent, ces prismes portent des modifications tangentes sur toutes les arêtes des bases (*fig.* 20, *pl.* III).

Nous avons vu que l'albite ou feldspath à base de soude se trouvait dans les granites relativement modernes, et que l'orthose ou feldspath à base de potasse existait dans les terrains anciens. C'est précisément dans ces granites anciens que l'on trouve le mica et il faut remarquer que ce minéral ne contient jamais de soude; dans les granites postérieurs, le mica est remplacé par le talc que nous décrirons plus loin.

On distingue parmi les variétés de mica, le mica hémisphérique que l'on trouve dans le granite de Limoges; les lamelles de mica sont des calottes sphériques se recouvrant les unes les autres.

A Barèges, on trouve le mica palmé dont les lamelles sont réunies de manière à simuler une feuille avec ses nervures.

La lépidolithe, beau minéral couleur lilas, est un mica qui se présente en masses que l'on peut décomposer en petites écailles; elle renferme de la lithine.

Le mica se trouve surtout au sein des terrains anciens dans les granites, les gneiss et les micaschistes; on le rencontre aussi dans des géodes au milieu des terrains volcaniques. Enfin, comme c'est un minéral des moins altérables, il a survécu à l'altération de certaines roches anciennes; il a été entraîné par les courants et ces lamelles se sont déposées à plat sur des couches sédimentaires auxquelles elles forment comme une enveloppe. On rencontre de ces lames de mica jusque dans les terrains tertiaires.

TALC

Comme le mica, le talc comprend une famille de minéraux, qui sont ordinairement vert clair, dont le caractère spécial est d'être onctueux au toucher comme le savon; le talc est infusible.

Chimiquement c'est un composé de silice, de magnésie et d'eau. Il y a deux sortes de talc pur: le talc lamelleux et le talc fibreux.

Le talc lamelleux, minéral blanc verdâtre, argentin et onctueux, donne une poussière blanche onctueuse; il est très-tendre et se laisse rayer à l'ongle, possède un éclat gras nacré. Densité 2,57. Il a un plan de clivage très-facile et se débite en lames transparentes vert clair; ces lames sont flexibles, mais non élastiques, ce qui les distingue du mica.

Le talc possède deux autres clivages moins faciles qui sont accusés par deux systèmes de stries parrallèles existant sur les lames.

Le talc fibreux est formé de longues fibres larges, soudées ensemble parallèlement les unes aux autres et faciles à séparer.

Les divers échantillons de talc pur (silicate de magnésie) diffèrent entre eux par la proportion d'eau ; la magnésie est quelquefois remplacée pour une faible proportion par son isomère, le protoxyde de fer, et moins souvent par un peu d'oxyde de nickel qui donne au minéral une couleur vert pomme.

Le talc se trouve en rognons dans les schistes talqueux, et en lamelles remplaçant le mica dans certains granites des Alpes appelés protogine.

Une variété de talc est la craie de Briançon qu'on rencontre en masses d'un blanc de lait, très-onctueuses et légèrement schisteuses, qui se laissent rayer à l'ongle. C'est un silicate de magnésie renfermant de l'eau et un peu d'oxyde de fer.

Un silicate de magnésie naturel est la serpentine, mais elle est plutôt à l'état de roche composée que de minéral.

AMPHIBOLE

Sous le nom d'amphibole on range trois espèces de minéraux qui, ayant même forme cristalline, présentent quelques différences dans leur composition et par suite dans leurs propriétés physiques.

Ces trois variétés sont :

1° l'amphibole trémolithe qui est blanche ;
2° l'amphibole actinote, qui est vert clair ;
3° l'amphibole hornblende, qui est noire et lamelleuse.

Amphibole blanche ou trémolithe. — C'est une variété que l'on trouve toujours pure ; mais elle est rare et on la rencontre disséminée dans les calcaires saccharoïdes et dans les roches schisteuses des terrains de transition.

Elle a pour forme un prisme rhomboïdal oblique (*fig.* 21, *pl.* III), dont les bases sont ordinairement modifiées par un biseau (*fig.* 22, *pl.* III) ; les clivages sont faciles parallèlement aux faces M. Densité 2,9.

Quelquefois un peu de graphite mélangé donne à la trémolithe une couleur grise.

On peut considérer la trémolithe comme un silicate double de chaux et de magnésie ; si 1 représente l'oxygène de la chaux, l'oxygène de la magnésie sera représenté par 3 et celui de la silice par 9 ($CaO,SiO^3 + 3\,MgO, 2\,SiO^3$).

La trémolithe cristallisée est l'exception ; on la rencontre le plus souvent en masses fibreuses, à éclat soyeux. Dans le Tyrol, on trouve une trémolithe en grosses fibres ou bâtons, d'où son nom de trémolithe bacillaire.

A côté de la trémolithe, il faut placer l'asbeste qui se présente en masses fibreuses déliées ; on peut même la séparer en fils soyeux susceptibles d'être tissés, qui constituent l'amiante. L'amiante dans l'antiquité avait une grande renommée ; on en faisait des toiles incombustibles (d'où le nom asbestes, incombustible), et dans ces toiles on brûlait les cadavres pour en recueillir les cendres. Dans les temps modernes on a cherché à en faire un papier incombustible.

L'asbeste ou amiante appartient tantôt à l'amphibole, tantôt au pyroxène ; ces deux minéraux ont une composition chimique peu différente, et dans plus d'un cas on est embarrassé pour les distinguer.

Il arrive quelquefois que les fibres de l'asbeste sont entremêlés et forment un feutre, ce qui donne un minéral mou et élastique cédant sous le doigt; on l'appelle liége fossile, cuir de montagne.

On rapproche encore de l'amphibole trémolithe un minéral, que l'on doit regarder comme complexe, qui est plus ou moins verdâtre, très-dur et très-résistant, facile à polir et à aiguiser. C'est le jade que l'on connaît sous le nom de pierre des amazones, pierre de hache, pierre de la circoncision.

Amphibole verte ou actinote. — L'actinote est intermédiaire entre la trémolithe et la hornblende. La trémolithe est un silicate double de chaux et de magnésie ($CaO, SiO^3 + 3MgO, 2SiO^3$); dans la hornblende, la magnésie est en partie remplacée par du protoxyde de fer et la formule est ($CaO, SiO^3 + 3(Mg, Fe)O, 2SiO^3$); mais la transition ne se fait pas aussi brusquement, et l'on trouve des minéraux intermédiaires (actinote) dans lesquels le protoxyde de fer remplace à la fois un peu de chaux et de magnésie.

L'actinote est d'un vert végétal, à teinte claire; elle est fusible en un verre peu coloré.

La grande différence de la trémolithe et de l'actinote consiste dans le gisement; la trémolithe n'existe que dans les terrains calcaires, et l'actinote dans les schistes talqueux où on la trouve en cristaux très-allongés.

Amphibole noire ou hornblende. — La hornblende se trouve plus fréquemment en cristaux que la trémolithe; toutefois, on en trouve rarement des cristaux nets; on trouve plus souvent des masses fibreuses, et plus souvent encore des masses lamelleuses qui se clivent facilement et présentent des surfaces de clivage miroitantes.

La forme primitive de la hornblende est la même que celle de la trémolithe (*fig.* 22, *pl.* III). La hornblende est noire, opaque; elle fond facilement et donne un émail noir; densité 3,16; les acides l'attaquent difficilement.

Sa formule est, nous l'avons vu plus haut ($CaO, SiO^3 + 3(Mg, Fe)O, 2SiO^3$), c'est donc une amphibole ferrugineuse.

Beaucoup d'échantillons de hornblende renferment de l'alumine dans une proportion qui va jusqu'à 25 p. 100; on admet que le second terme de la formule est alors un alumino-silicate de fer et de magnésie, et cette formule s'écrit: $CaO, SiO^3 + 3(Mg, Fe)O, 2(Si, al)O^3$.

L'amphibole se trouve dans les gneiss, dans les schistes micacés, dans la syénite qui est un granite amphibolique, dans les diorites et dans les roches volcaniques anciennes et modernes.

PYROXÈNE

Le pyroxène comprend une famille de minéraux, souvent tellement distincts au point de vue de la composition chimique que longtemps on s'est refusé à les associer; mais on reconnaît bien vite qu'ils ont entre eux un rapport intime, si l'on remarque qu'ils ont tous la même forme cristalline, que leurs cristaux ont le même angle.

Le pyroxène est un silicate double de chaux et de magnésie; mais la chaux peut se trouver remplacée par le protoxyde de fer, et la magnésie elle-même par les protoxydes de fer et de manganèse. La formule type est $(Ca, Mg)O, 2SiO^3$; elle correspond à ce que l'on appelle le diopside; la base peut avoir les diverses formules (Ca, Fe) O; (Ca, Mg, Fe) O qui correspond à l'augite (Fe, Mg) O, (Ca, Mn) O, (Fe, Mn) O.

En réalité, il n'y a que deux espèces principales :

1° le pyroxène diopside, qui est à base de chaux et de magnésie;
2° le pyroxène augite, qui est à base de chaux, oxyde de fer et magnésie.

En dehors de ces deux divisions, se trouvent les silicates de manganèse, qui appartiennent au pyroxène, vu leur composition, et dont les bases sont (Ca, Mn) O, et (Fe, Mn) O.

Diopside. — Le diopside est le pyroxène pur. Quelques échantillons sont blancs ; la plupart sont vert clair et transparents, quelques-uns ont une teinte verte assez foncée. C'est d'après ces teintes variées que l'on reconnaît les diverses espèces de diopside.

La forme primitive du diopside est un prisme rhomboïdal oblique ; et la forme la plus fréquente est un prisme rectangulaire surmonté d'un pointement qui offre de nombreuses facettes.

Le diopside a quatre clivages, dont deux faciles, parallèles aux faces latérales M du prisme rhomboïdal oblique.

On trouve de fort beaux cristaux de diopside, blancs et transparents dans la vallée d'Ala, en Piémont. Dans la mine d'argent de Sahla, en Norwége, se rencontre du diopside vert grisâtre, peu brillant, relativement tendre, et qui semble avoir subi un commencement de décomposition.

Dans beaucoup de cristaux de diopside à teinte verte, on voit cette teinte se dégrader peu à peu et passer au blanc.

Le diopside de Fassa se présente en cristaux d'un beau vert végétal ; d'autres échantillons sont vert foncé.

On connaît une autre variété qui existe en masses amorphes, opaques ou légèrement translucides, d'une couleur blanc verdâtre, à poussière blanche ; il semble que ce soit tout simplement du silicate de magnésie $MgO, 2\,SiO^2$.

A Mussa, en Piémont, on trouve un diopside bacillaire, qui est composé de grandes baguettes plates d'un vert grisâtre.

Nous signalerons encore un diopside formé de grains plus ou moins gros, et un diopside compacte que l'on trouve dans les Pyrénées.

Augite. — L'augite, qui a même forme primitive que le diopside, se présente le plus souvent en prismes à six faces aplatis. Il est noir foncé, opaque, et fond en émail noir. Densité 3,3. L'augite renferme toujours un peu d'alumine.

Entre l'augite et le diopside, on place l'hypersthène, minéral en cristaux aplatis et même en masses lamelleuses, qui se confond avec le pyroxène par la forme cristallographique. Il renferme de la silice, de la chaux, de la magnésie, des protoxydes de fer et de manganèse, avec un peu d'alumine. Il se distingue des autres variétés de pyroxène en ceci que, mélangé à l'albite il forme des roches considérables qui sont dénuées de quartz.

Le pyroxène et l'amphibole se ressemblent beaucoup ; mais ils n'ont pas les mêmes gisements Le diopside ne se rencontre qu'en filons au milieu de divers terrains ; l'augite forme des roches porphyriques et surtout des roches volcaniques : mélaphyres, basaltes, trapps. La hornblende se trouve bien aussi dans les terrains volcaniques, mais surtout dans les terrains volcaniques anciens.

Une chose assez remarquable est que le pyroxène se produit artificiellement, dans les scories de certains hauts fourneaux.

Argile. — L'argile n'est vraiment un minéral qu'à l'état de kaolin. Le plus souvent c'est une roche composée, dont nous aurons lieu de parler plus loin.

QUELQUES MINÉRAUX USUELS

Avant d'abandonner ce chapitre, il nous semble utile de passer rapidement en revue quelques minéraux dont les noms se rencontrent souvent dans la pratique, bien qu'ils ne soient pas inscrits à notre programme :

Diamant. — Ce minéral est du carbone pur, le plus dur des minéraux. Il cristallise dans le premier système ; sa forme ordinaire est l'octaèdre régulier.

Sel gemme. — Facile à reconnaître par sa saveur. Forme ordinaire : le cube. On le trouve à l'état fibreux. Il en existe des mines considérables, surtout en Allemagne, Pologne et Russie ; il se présente en masses stratifiées dans le terrain du trias et surtout dans les marnes irisées. Il y forme d'immenses lentilles de plusieurs kilomètres de longueur, c'est ainsi qu'il existe en France, à Château-Salins. On en trouve encore dans les terrains tertiaires, à Bex, en Suisse, à Salzbourg, à Orthez, dans les Pyrénées, etc.

Corindon. — Les variétés de corindon sont de l'alumine tantôt pure, tantôt mélangée d'oxyde de fer, de chaux, de silice, de magnésie. On en trouve d'un beau rouge rubis, ou d'un bleu saphir. Il existe à l'état granulaire et fournit l'émeri, poudre dure avec laquelle on taille le verre.

Grenats. — Les grenats sont des silicates d'alumine et de chaux. L'alumine peut s'y trouver en partie remplacée par son isomorphe le peroxyde de fer, et la chaux par les protoxydes qui lui sont isomorphes. Les grenats ont des couleurs variées ; il y en a de verts, d'autres rouge violet (Tyrol et Oural), d'autres très-foncés et presque noirs (mélanite des Pyrénées), d'autres couleur émeraude, parce qu'ils renferment du chrome ; enfin, le grenat existe aussi en roches compactes. On le rencontre épars dans presque toutes les roches cristallines.

Émeraude. — Pierre précieuse, lorsqu'elle est parfaitement transparente et d'une belle couleur verte ; lorsqu'elle a la teinte vert d'eau, on la rencontre plus fréquemment dans les montagnes granitiques. Les émeraudes transparentes et légèrement colorées en vert d'eau s'appellent aigue-marine et béryl. Chimiquement, on peut dire que ce sont des silicates doubles d'alumine et de glucine, avec un peu de protoxyde de fer. Les plus belles émeraudes viennent du Pérou.

Chlorites. — Les chlorites sont des minéraux cristallisés d'une belle couleur verte, comme leur nom l'indique, on les trouve dans la dolomie et dans l'asbeste du Saint-Gothard. C'est un minéral tendre, onctueux, flexible, mais non élastique, qui renferme de la silice, de l'alumine, de la magnésie et du peroxyde de fer.

Péridot. — Le péridot est un minéral cristallisé, connu depuis longtemps, et que l'on trouve au Vésuve en assez grande quantité. Sa couleur est vert olive clair, tournant quelquefois au jaune d'or. Le péridot est infusible ou très-difficilement fusible. Il est formé de silice, de magnésie et de protoxyde de fer, avec des proportions minimes de protoxydes de manganèse et de nickel.

Topaze. — La topaze cristallisée est une pierre précieuse d'un jaune caractéristique, et parfaitement transparente. La teinte jaune varie de l'orange à la teinte de vin ; on trouve quelquefois des topazes bleuâtres ou verdâtres. La topaze, portée à une température élevée, ce qu'on appelle la topaze brûlée, passe au rouge violet et prend une teinte vive. La topaze est composée de silice, d'alumine et d'acide fluorique. On la trouve à l'état de cailloux roulés dans les alluvions aurifères du Brésil, et dans certains terrains anciens.

Spinelle. — Le spinelle est un aluminate de magnésie, dans lequel la magnésie peut se trouver partiellement remplacée par du protoxyde de fer. Parmi les

spinelles, on range le rubis spinelle (rouge ponceau vif), le rubis balais (rose violacé), le candite et le ceylanite qui sont d'un noir ou d'un vert foncé.

Succin. — Le succin ou ambre jaune se trouve au milieu des lignites ; il renferme de l'acide succinique à qui il doit son odeur. Il est formé par le mélange d'une huile volatile, de deux résines, d'acide succinique et d'un bitume insoluble. C'est une résine fossile fournie par un arbre dont les parties végétales se sont transformées en lignite.

Le succin est un exemple de matières organiques constituant des minéraux : nous citerons encore ce qu'on appelle le suif de montagne, corps gras ($C^{10}H^{10}$) qui semble dû à la décomposition d'essences fossiles.

Bitumes. — De même les bitumes sont engendrés par la décomposition de substances organiques. Les plus importantes sont : 1° l'huile de naphte, qu'on trouve au milieu de grès argileux et calcaires appartenant au terrain tertiaire moyen. On la recueille dans les Pyrénées, en Italie et surtout en Perse, et on la retire au moyen de puits ; 2° l'huile de pétrole, qui se trouve souvent au milieu des combustibles fossiles et quelquefois dans des terrains volcaniques où il existe des sources de pétrole ; elle est plus colorée et plus épaisse que l'huile de naphte ; on en trouve en France à Gabian, dans le Languedoc, au Puy de la Poix, en Auvergne ; 3° l'asphalte qui est un mélange d'huile, de charbon et de résine, sur lequel nous reviendrons plus tard. La mer Morte en fournit de grandes quantités qu'on appelle bitume de Judée.

COMBUSTIBLES MINÉRAUX

Parmi les combustibles minéraux, il y en a de liquides, tels que les huiles de naphte et de pétrole, dont nous avons parlé plus haut ; ils servent surtout à l'éclairage, toutefois on a tenté dans ces derniers temps de les brûler dans le foyer des locomotives, l'essai a réussi ; mais nous croyons qu'il n'a pas été répété.

Les bitumes sont aussi des combustibles minéraux, mais fort imparfaits. En somme, il y a deux grandes classes de combustibles fossiles dont l'usage est général :

1° L'anthracite et la houille, qui sont des combustibles anciens que l'on trouve dans les terrains antérieurs à la craie ;

2° Les lignites et la tourbe, combustibles moins parfaits que les précédents, qui sont de formation postérieure à la craie et qui aujourd'hui encore prennent naissance sous nos yeux.

Nous étudierons ces divers minéraux dans l'ordre de leur ancienneté.

Anthracite. — L'anthracite (du grec *anthrax*, charbon) est une houille fort ancienne ; la houille est le résultat de la carbonisation de végétaux qui recouvraient le sol à certaines époques. Dans l'anthracite, la décomposition de l'organisme végétal est pour ainsi dire complète ; les principes volatils que le bois renferme ont presque complétement disparu, et la teneur en charbon dépasse 90 p. 100.

On ne trouve plus trace dans l'anthracite de la conformation végétale ; c'est un corps homogène, possédant un éclat vitreux très-vif et sa cassure est nette sans être lamelleuse comme celle de la houille.

C'est du moins ce qu'on remarque dans les anthracites anciennes.

On en rencontre de mélangées à la houille, et, dans la masse, on passe par

gradations insensibles de la houille à l'anthracite ; l'aspect dépend peut-être de la différence des végétaux qui se sont carbonisés en tel ou tel endroit.

Mais il est aussi probable qu'en plus d'un cas l'anthracite est une houille métamorphique ; des roches volcaniques en fusion, des filons quelconques ont pénétré dans le terrain houiller et s'y sont solidifiés en abandonnant beaucoup de chaleur et en faisant subir à la houille un commencement de distillation qui a eu pour effet de chasser une partie des substances volatiles et par suite d'augmenter la proportion de carbone. Ce phénomène a été remarqué en plus d'un endroit, par exemple à La Mure en France.

Nous aurons lieu de revenir plus loin sur la composition chimique de l'anthracite.

Au-dessus de l'anthracite, nous devons placer un minéral, le graphite, qui renferme 95 à 96 p. 100 de carbone. On l'a pris longtemps pour du carbone natif, mais on y rencontre des empreintes végétales et il faut le regarder comme une transformation métamorphique très-énergique de la houille, car il est constamment cristallin. Il est gris métallique, doux et onctueux, s'égrène facilement et donne la mine de plomb, avec laquelle on fabrique les crayons Conté.

Certains graphites renferment un peu de fer, mais le fait est accidentel. Le graphite se trouve en beaucoup d'endroits, mais en petites quantités, dans les terrains de transition, et souvent il enduit d'une couche tachante les gneiss et les micaschistes. Il existe sous forme de veines que l'on trouve en France, aux environs de Napoléonville et près de Briançon au col du Chardonnet.

HOUILLES

Les houilles se trouvent dans le terrain houiller auquel elles ont donné leur nom et qui est de formation antérieure à la craie.

Les couches différentes sont très-nombreuses et très-variables d'épaisseur et de composition, elles sont entremêlées d'argiles, de sables et quelquefois de pyrites de fer.

Les couches de houille sont, comme nous l'avons vu en géologie, fort irrégulières, il s'y trouve souvent des failles ; elles ont été remuées, tourmentées et brisées.

On n'exploite que les couches qui ont plus de $0^{m},50$ d'épaisseur ; l'épaisseur va en croissant avec la profondeur.

Gisement. — Voici l'étendue des bassins houillers exploités dans les diverses contrées :

Amérique du Nord.	5,000,000	kilomètres carrés.
Angleterre.	13,000	—
France.	2,500	—
Belgique.	1,275	—
Prusse rhénane.	2,400	—
Westphalie, Saxe et Bohême.	2,000	—
Asturies d'Espagne.	500	—
Russie.	250	—

Les houilles belges sont d'excellente qualité : elles proviennent de trois bassins : 1° le bassin de Mons ; 2° le bassin du centre, à l'est du précédent ; 3° le bassin de Charleroi, contigu à celui du centre.

Les bassins français sont : 1° le bassin de Valenciennes, où l'on trouve Anzin,

Aniche, Vicoigne, etc. ; 2° le bassin de Calais, d'exploitation récente (Lens, Bully-Gruai) ; 3° les nombreux bassins du centre de la France, parmi lesquels on distingue celui de Saint-Étienne, et ceux d'Autun, de Blanzy, du Creusot, de Decize, etc. ; 4° les bassins du Midi, en tête desquels il faut placer Aubin et Decazeville dans l'Aveyron, et Alais dans le Gard.

L'Angleterre est le pays d'Europe le plus riche en houille. La houille est souvent mélangée à du carbonate de fer, et la fabrication du fer peut alors s'effectuer à très-bon marché.

La production annuelle est, en 1870 :

Pour l'Angleterre de.	98 millions de tonnes.
Pour la Confédération allemande.	20 —
Pour la France.	12 —
Pour la Belgique.	12 —
Pour l'Autriche et la Bohême.	3 —
Pour l'Espagne.	400,000 tonnes.

On voit d'après ces chiffres, que la consommation de la houille est considérable ; on calcule que les gisements anglais seront épuisés dans cent ans ; mais d'ici là, probablement on trouvera d'autres producteurs de chaleur et du reste il existe en Asie (surtout en Chine), en Amérique et en Australie des provisions considérables de houille auxquelles on n'a pas encore touché.

Caractères physiques de la houille. — La couleur de la houille est en général d'un beau noir, dit noir de velours. Densité variable de 1,16 à 1,6 suivant la compacité et l'ancienneté— poussière noire. Les houilles sont peu dures, fragiles et présentent une cassure lamelleuse.

On les divise en houilles sèches, houilles grasses et houilles maigres.

Dans une masse de houille, on voit que les diverses couches sont séparées par des feuillets de constitution spéciale, suivant lesquels les morceaux se détachent toujours. Ces feuillets sont formés de fibres, dans lesquels le microscope permet de reconnaître des éléments de végétaux fossiles ; ils ont quelquefois une certaine épaisseur et sont formés d'anthracite presque pure. Lorsque le nombre en est considérable dans une houille, ils forment sur les côtés de chaque morceau une série de stries ; la houille est alors très-friable et il arrive des cas où on ne peut l'exploiter qu'en petits morceaux. Ces houilles sont alors analogues à l'anthracite, elles s'allument et brûlent difficilement, sans donner de flamme ; elles ne se ramollissent pas et ne se soudent pas dans le foyer. Ce sont des houilles sèches ; on reconnaît à l'analyse que ces houilles sont plus riches que les autres en carbone et moins riches en azote, hydrogène et oxygène. Les houilles sèches ne renferment donc que fort peu de bitume, et c'est le bitume qui donne aux houilles grasses leurs propriétés. La houille sèche, se rapprochant de l'anthracite, est de couleur plus claire que la houille grasse, elle est gris d'acier. Souvent elle renferme des pyrites de fer et donne en brûlant une odeur infecte ; on ne peut alors l'employer au travail des hauts fourneaux, elle donne beaucoup de cendres et on la réserve pour la fabrication de la chaux. A moins que la houille sèche ne renferme beaucoup de ces feuillets fibreux dont nous avons parlé plus haut, et qui lui donnent une cassure feuilletée, elle présente plutôt une cassure conchoïde qu'elle doit à sa compacité. La meilleure houille sèche vient de Mons et d'Anzin.

La houille grasse a une texture feuilletée ; elle est formée d'une quantité de petites assises, les unes brillantes et compactes, les autres ternes et tachantes. Ces parties ternes se comportent comme la houille sèche et brûlent sans

flamme ; les parties brillantes au contraire, sont imprégnées de bitumes ou de substances volatiles et brûlent avec flamme, elles s'allument facilement. Suivant la proportion des couches compactes et des couches pulvérulentes, la houille est plus ou moins grasse. Ce qui caractérise la houille grasse, c'est de brûler assez facilement et de brûler avec flamme. La houille grasse, dont les morceaux se soudent le mieux pendant la combustion, s'appelle en France, houille maréchale parce qu'elle convient très-bien aux travaux de forge. On la trouve à Newcastle, à Saint-Étienne, à Alais. Ce qui distingue la houille grasse, c'est la couleur noir de velours.

Il ne faut pas croire que tel bassin donne exclusivement de la houille grasse et tel autre de la houille sèche ; la qualité dépend surtout de la couche exploitée ; et la houille devient de plus en plus sèche c'est-à-dire anthraciteuse, à mesure que l'on descend plus profondément dans le bassin. Quelquefois, on rencontre des variations dans une même couche, mais c'est qu'alors cette couche a été soumise à des influences métamorphiques.

La troisième classe de houille est ce qu'on appelle la houille maigre, qui est moins noire que la houille grasse et qui par ce fait ressemblerait à la houille sèche ; mais elle s'en distingue par la longue flamme qu'elle produit à la combustion. La houille maigre est très-riche en gaz, elle ne renferme pas ces produits bitumineux qui donnent à la chaux grasse ses propriétés collantes ; elle convient parfaitement à la fabrication du gaz d'éclairage, mais elle donne un coke qu'on ne peut guère utiliser à cause de son peu de cohérence. La houille maigre à cause de sa longue flamme rend de grands services dans plus d'une opération métallurgique et dans le chauffage des appareils à vapeur. On la trouve en Angleterre, dans le Lancashire et à Blanzy, en France.

Formation des houilles. — Les fossiles du terrain houiller nous ont montré que la houille était due à la décomposition d'une grande masse de végétaux. Nous avons vu les différents types de ces végétaux dont on retrouve les empreintes non-seulement dans la houille mais encore dans les argiles et dans les roches du terrain carbonifère.

On s'est quelquefois imaginé que les dépôts de charbon de terre étaient dus à la carbonisation de végétaux transportés par des courants violents et déposés au milieu d'eaux tranquilles. C'est ainsi que de nos jours, nous voyons les grands fleuves de l'Amérique, le Mississipi, les Amazones, charrier d'immenses radeaux de troncs d'arbres arrachés aux rives : cette masse flottante se dépose dans l'Océan à une certaine distance de l'embouchure et doit se carboniser au fond des eaux.

Mais cette cause n'a pas assez de puissance pour expliquer à elle seule la formation des bassins houillers, et du reste elle est en contradiction avec l'aspect de ces bassins. On y remarque que les troncs d'arbre y sont presque toujours debout, et ne présentent point cette confusion, cet enchevêtrement, ce bouleversement qui règne dans les masses flottantes dont nous parlions plus haut.

D'après cela, nous devons dire que la houille est due à une végétation puissante ensevelie sur place.

A l'époque où cette végétation existait, la croûte solide de la terre était très-mince et la chaleur intérieure devait maintenir à la surface une température uniforme et assez élevée. Il existait dans l'atmosphère des masses énormes de vapeur d'eau et d'acide carbonique ; or, les plantes se nourrissent avec l'humidité et l'acide carbonique ; leur développement devait donc être rapide et consi-

dérable. Parmi les plantes de cette époque, on trouve des plantes d'organisation imparfaite, à croissance rapide, telles que les cryptogames, les mousses, les prêles et les fougères, avec quelques palmiers.

Les couches végétales s'accumulaient au pied de ces forêts immenses, puis arrivait un mouvement de l'écorce terrestre, peu résistante alors, et la forêt s'engloutissait ou devenait marécage; une couche d'argile se reformait peu à peu, la végétation reprenait son cours pour former une nouvelle couche de débris organiques.

Peu à peu, la température élevée, la pression des couches supérieures carbonisait tous ces débris et les comprimait en masses d'autant plus compactes que la couche était plus profonde.

Tel est le mécanisme de la formation de la houille. M. L. Figuier, dans son livre intitulé *la Terre avant le déluge*, l'explique fort bien et nous croyons devoir lui emprunter les lignes suivantes:

Mode de formation des couches de houille. — La houille n'est autre chose que le résultat de la décomposition partielle des plantes qui couvraient la terre pendant une période géologique qui a été d'une durée immense.

Personne aujourd'hui ne met cette origine en doute. On trouve fréquemment, dans les mines de houille, de menus débris de ces plantes mêmes dont les troncs et les feuilles caractérisent le terrain houiller ou carbonifère. Plus d'une fois on a rencontré, au milieu d'un banc de houille, d'immenses troncs d'arbres. Le sol en s'enfonçant les a plongés sous l'eau, des terres les ont plus tard recouverts, et leur tronc s'est conservé tout entier avec ses racines.

C'est ce que l'on a vu, par exemple, dans la mine de houille du Treuil, à Saint-Étienne.

En Angleterre, dans l'Amérique du Nord, on a trouvé de même des arbres entiers traversant les couches de houille, ou qui leur étaient superposés.

« Dans la houillère de Parkfield-Colliery, dit M. Lyell, dans le Straffordshire méridional, on a mis à découvert, en 1854, sur une surface de quelques centaines de mètres, une couche de houille qui a fourni plus de soixante-treize troncs d'arbres garnis encore de leurs racines. Quelques-uns de ces troncs mesuraient plus de 3 mètres de circonférence ; leurs racines formaient en partie une couche de houille épaisse de 25 centimètres, reposant sur un lit d'argile de 50 millimètres, au-dessous duquel était une seconde forêt superposée à une bande de houille de 60 centimètres à $1^{m},50$; au-dessous existait une troisième forêt avec de gros troncs de *lepidodendrons*, de *calamites* et d'autres arbres. »

Dans la baie de Fundy (Nouvelle-Écosse), M. Lyell a trouvé, sur une épaisseur de houille de 400 mètres, 68 niveaux différents, présentant les traces évidentes de plusieurs sols de forêts dont les troncs d'arbres étaient encore garnis de leurs racines.

Nous chercherons à établir ici avec beaucoup de soin la véritable origine géologique de la houille, afin de ne laisser aucun doute dans l'esprit de nos lecteurs sur une question aussi importante.

Pour expliquer la présence de la houille au sein de la terre, il n'y a que deux hypothèses possibles. Ces dépôts carbonifères peuvent résulter de l'enfouissement de plantes qui auraient été amenées de loin et transportées par les fleuves ou les courants maritimes, en formant comme d'immenses radeaux, qui seraient venus s'échouer en différents lieux, et auraient été plus tard recouverts par des terrains nouveaux ; ou bien les plantes qui composent la houille sont nées sur place : elles résulteraient, dans cette seconde hypothèse, de la décomposition, accomplie sous

terre, d'une masse accumulée de végétaux qui sont nés et qui ont péri dans les lieux mêmes où on les trouve.

Examinons chacun de ces deux systèmes d'explication.

Les couches de houille peuvent-elles résulter du transport par les eaux et de l'enfouissement d'immenses radeaux formés de troncs d'arbres? Cette idée a contre elle la hauteur énorme qu'il faudrait supposer à ces radeaux pour en faire des couches de houille aussi épaisses que celles dont les lits successifs composent nos mines de charbon. Si l'on prend, en effet, en considération le poids spécifique du bois, et son contenu en carbone, on trouve que les dépôts houillers actuels ne peuvent être que les 7 centièmes environ du volume primitif du bois et autres matières végétales qui leur ont donné naissance. Si l'on tient compte, en outre, des nombreux vides résultant nécessairement d'un entassement irrégulier de débris dans le radeau supposé, on reconnaît que la houille, qui a été formée par des plantes d'un poids spécifique peu considérable, ne peut guère représenter que les 5 centièmes de l'épaisseur du radeau hypothétique qui aurait produit cette même houille. Une couche de charbon de terre de 5 mètres d'épaisseur, par exemple, aurait exigé, d'après cela, un radeau d'une épaisseur de 95 mètres. De tels radeaux ne pourraient flotter ni dans nos rivières, ni dans une grande partie de nos mers, par exemple dans la Manche, ni sur la côte orientale de l'Amérique du Sud, etc. D'ailleurs, ces accumulations de bois n'auraient jamais pu s'arranger assez régulièrement pour former ces couches de charbon parfaitement stratifiées et d'une épaisseur égale sur des étendues de plusieurs kilomètres, que l'on voit dans la plupart des gisements houillers se succéder par superposition, séparées par des bans de grès ou d'argile. Et même en admettant une accumulation lente et graduelle de débris végétaux, comme cela peut arriver à l'embouchure des fleuves, les végétaux n'auraient-ils pas été alors noyés dans une grande quantité de limon et de terre? Or, dans la plupart des couches de houille, la proportion des matières terreuses ne dépasse pas 15 p. 100. Si nous invoquons enfin le parallélisme remarquable que l'on observe dans les différents lits du terrain houiller, et la belle conservation qu'on y admire des empreintes des parties végétales les plus délicates, il restera démontré que ces formations se sont opérées avec une tranquillité parfaite. Nous sommes donc forcé de conclure que la houille résulte de la fossilisation des végétaux opérée sur place, c'est-à-dire dans les lieux mêmes où ces végétaux ont vécu.

Pour comprendre entièrement le phénomène de la transformation en houille des forêts et des plantes herbacées qui remplissaient les marécages de l'ancien monde, il est une dernière considération à présenter. Pendant la période houillère, l'une des plus anciennes de l'histoire du globe, la croûte terrestre, alors à peine consolidée ne formait qu'une enveloppe très-élastique, en raison de son immense étendue, et qui reposait sur la masse liquide intérieure. Cette croûte élastique était agitée par des mouvements alternatifs d'élévation et d'abaissement de la masse liquide interne, qui était soumise encore, comme le sont nos mers actuelles, à l'attraction lunaire, ce qui donnait naissance à des sortes de marées souterraines, pouvant produire, à des intervalles plus ou moins éloignés, des affaissements du sol. C'est peut-être par un de ces affaissements du sol que les forêts et les grandes masses végétales de l'époque houillère se trouvaient submergées, et que les herbes et arbustes, après avoir couvert un certain temps la surface de la terre, finissaient par être noyés sous les eaux. Après cette submersion, de nouvelles forêts se développaient dans le même lieu et sur le même sol. Par un nouvel affaissement, ces forêts s'enfonçaient à leur tour sous les

eaux. C'est probablement par la succession de ce double phénomène : l'enfouissement des plantes et le développement sur le même terrain de masses végétales nouvelles, que les énormes amas de plantes à demi décomposées qui constituent la houille se sont accumulés pendant une longue série de siècles.

La houille a-t-elle été produite par de grands végétaux, par exemple, par les grands arbres des forêts de cette époque, tels que les lepidodendrons, sigillarias, calamites et sphenophyllums? Cela est peu probable. Plusieurs dépôts houillers ne contiennent aucun vestige des grands arbres de la période houillère, mais seulement des fougères herbacées et autres plantes de petite taille. La grande végétation a donc été à peu près étrangère à la formation de la houille, ou, du moins, elle n'a joué dans cette fossilisation qu'un rôle accessoire. Il y avait pendant la période houillère, comme de nos jours, deux végétations simultanées : l'une formée d'arbres de haute futaie ; l'autre herbacée, aquatique, se développant sur des plaines marécageuses. C'est cette dernière végétation qui a surtout fourni la matière de la houille, de même que ce sont les plantes herbacées des marais qui alimentent nos tourbières actuelles, cette sorte de houille contemporaine.

Quel genre de modifications ont dû subir les végétaux de l'ancien monde, pour arriver à cet état de masse charbonneuse et chargée de bitume qui constitue la houille ?

Les plantes submergées durent présenter d'abord une masse légère et spongieuse, complétement analogue à la tourbe actuelle de nos terrains marécageux. En séjournant sous les eaux, ces masses végétales y subirent une pourriture partielle, une fermentation, dont les diverses phases chimiques sont mal aisées à définir. Ce qu'on peut affirmer toutefois, c'est que la décomposition, la fermentation des tourbes de l'ancien monde, s'accompagna de la production de beaucoup de carbures d'hydrogène, gazeux ou liquides.

Telle est l'origine des carbures d'hydrogène, qui imprègnent la houille, et celle des huiles goudronneuses dont sont pénétrés les schistes bitumineux. Cette émission de gaz hydrogène bicarboné dut même se continuer après l'enfouissement des couches de tourbe sous les terrains qui vinrent les recouvrir.

C'est la pression et le poids de ces terrains qui ont donné à la houille la densité considérable qui la distingue, et son état de forte agrégation. La chaleur émanée du foyer intérieur du globe, et qui se faisait encore sentir à sa surface, dut aussi exercer une grande influence sur le résultat final. C'est à ces deux causes, c'est-à-dire à la pression et au plus ou moins grand échauffement par le foyer terrestre central, que l'on doit attribuer les différences qui existent dans la nature minéralogique des différentes houilles, à mesure que l'on s'élève de la base du terrain houiller vers les dépôts supérieurs. Les couches inférieures sont plus sèches et plus compactes que les supérieures, parce que leur minéralisation a été complétée sous l'influence d'une température plus élevée, et en même temps d'une pression plus forte.

Une expérience qui a été tentée pour la première fois, en 1833, à Saint-Bel, reprise ensuite par M. Cagniard de la Tour, et qui a été complétée à Saint-Étienne, en 1858, met tout à fait en évidence le mode de formation de la houille : on a réussi à produire artificiellement de la houille très-compacte en exerçant sur du bois et autres matières végétales la double influence de la chaleur et de la pression.

L'appareil imaginé par M. Baroulier permet d'exposer des matières végétales, enveloppées d'argile humide et fortement comprimées, à des températures long-

emps soutenues, comprises entre 200° et 300°. Cet appareil, sans être absolument clos, met obstacle à l'échappement des gaz ou des vapeurs, de sorte que la décomposition des matières organiques s'opère dans un milieu saturé d'humidité, et sous une pression qui s'oppose à la dissociation des éléments dont elles se composent. En plaçant dans ces conditions de la sciure de bois de diverse nature, on a obtenu des produits dont l'aspect et toutes les propriétés rappellent tantôt les houilles brillantes, tantôt les houilles ternes. Ces différences tiennent d'ailleurs aux conditions de l'expérience, ou à l'essence du bois employé; aussi paraissent-elles expliquer la formation des houilles *striées*, ou composées d'une succession de veinules alternativement éclatantes et mates.

Quand on comprime des tiges et des feuilles de fougère entre des lits d'argile ou de pouzzolane, elles se décomposent par cette seule pression, et forment sur ces blocs un enduit charbonneux et des empreintes tout à fait comparables aux empreintes végétales des blocs de houille.

Ces dernières expériences, qui ont été faites pour la première fois par un physicien anglais, M. Tyndall, nous font comprendre le mode de formation de la houille aux dépens des végétaux de l'ancien monde. »

Composition chimique de la houille. — Les principes immédiats de la houille sont les mêmes que ceux des végétaux qui lui ont donné naissance.

Si l'on traite les charbons gras par l'alcool, l'éther et le chloroforme, on leur enlève des huiles odorantes. Les mêmes dissolvants n'enlèvent rien aux charbons maigres.

On trouve dans ce fait l'explication de la manière dont ces deux classes de houilles se conduisent au feu.

L'analyse des houilles ne peut donner des résultats constants dans un bassin, ni même dans une couche particulière, et cela se conçoit quand on réfléchit à la variété d'éléments végétaux qui ont produit la houille et à la proportion variable de matières minérales étrangères qui s'y sont mêlées. On ne peut donner que des moyennes et c'est ce qu'ont fait en France MM. Regnault et de Marsilly, ingénieurs des mines, et voici la moyenne générale qui résulte de leurs travaux :

	CARBONE	HYDROGÈNE	AZOTE	OXYGÈNE	SOUFRE	CENDRES
1° Cendres comprises.	79,3	4,8	0,8	7,8	1,7	5,55
2° Déduction faite des cendres.	84,0	5,1	0,8	10,1		»
Ou en nombres ronds. . . .	84,0	5,0	1,0	10,0		»

La quantité de cendres fournie est excessivement variable ; on trouve dans les cendres de l'oxyde de fer, de l'alumine, de la chaux, de la silice, de l'acide sulfurique, du soufre et de ses composés. A ces corps se joignent quelquefois le chlore, l'acide phosphorique, la magnésie, la potasse et la soude. On y trouve exceptionnellement quelques métaux: Titane, plomb, zinc, cadmium, nickel, arsenic et antimoine.

Ces renseignements sur les cendres de houille, nous sont fournis par la chimie technologique de MM. Debize et Mérijot, ingénieurs des manufactures de

l'État, auxquels nous empruntons le paragraphe suivant relatif aux houilles pyriteuses :

Houilles pyriteuses. — « La présence de la silice et de l'alumine dans les cendres de houilles, ainsi que ce fait que les alcalis s'y retrouvent combinés à la silice, démontrent que les masses de houille ont été soumises aux infiltrations des schistes qu'on rencontre si fréquemment dans les gisements de houille. A ces éléments, s'est ajouté, également par voie d'infiltration, le sulfure de fer. Dans l'acte de la combustion de la houille, ce sulfure se transforme en oxyde de fer que l'on retrouve dans les cendres. Il suit de là que la couleur rouge des cendres dénote une teneur en soufre élevée, tandis que la couleur grise ou blanche est une preuve du contraire. C'est à la présence du sulfure de fer que beaucoup de houilles doivent de se déliter lorsqu'on les expose à l'air. Il se forme du sulfate de fer, qu'on retrouve souvent en abondance dans les eaux des mines, du sulfate basique en flocons jaunes et un alun ferrugineux qui s'effleurit. Beaucoup de houilles, en se délitant ainsi, se réduisent complétement en poussière; pour d'autres, surtout quand elles sont en tas, la température va en s'élevant quelquefois jusqu'à produire la combustion de la masse.

Une proportion trop grande de pyrites dans la houille est une source d'inconvénients graves pour les barreaux des grilles et les autres parties des foyers. Les pyrites dégagent en effet au feu des vapeurs de soufre qui, au contact des barreaux chauffés au rouge, donnent naissance à du monosulfure de fer très-fusible. Quelquefois, cette attaque est assez considérable pour que le sulfure forme des sortes de stalactites à la partie inférieure des grilles. Dans certaines circonstances, l'oxyde de fer provenant des pyrites de houille donne lieu à une forte proportion de laitier, en se combinant avec la chaux des cendres et la petite quantité d'alcalis qu'elles renferment. Beaucoup de cendres deviennent alors complétement liquides, d'autres se ramollissent jusqu'à devenir collantes et à s'agglomérer.

Cette manière dont les cendres se comportent a dans la pratique une grande importance; les cendres collantes ont en effet l'inconvénient d'encrasser les grilles, de réduire le tirage et de nuire à la marche du feu. En général, une houille est donc, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant meilleure que ses cendres sont moins collantes. Ce n'est que dans des cas exceptionnels, comme pour les houilles du sud du pays de Galles que cette propriété peut être utile, en permettant d'utiliser certaines houilles maigres et de peu de valeur. Ces houilles ne se brûlent pas en effet sur des grilles à travers lesquelles elles tamiseraient, mais sur une couche de 30 à 40 centimètres de cendres agglomérées dont les vides et les boursouflures laissent encore à l'air une circulation suffisante. »

Modifications que subit la houille exposée à l'air. — La houille exposée à l'air abandonne les substances volatiles dont elle est imprégnée, et non-seulement les substances gazeuses mais encore les huiles qui rendent la houille collante. Ces modifications, fort importantes au point de vue pratique, ont été étudiées par M. l'ingénieur de Marsilly et exposées par lui dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences, mémoire dont nous extrayons les lignes suivantes :

« 1° La houille, quand elle est récemment extraite, subit un commencement de décomposition à une température inférieure à 100° ; elle dégage du gaz et de l'eau mêlée d'huiles carburées ; le dégagement ne devient abondant qu'au delà de 100° et continue jusqu'à une température de 330°, et probablement même au-delà jusqu'au point où la décomposition de la houille devient complète.

2° Les houilles qui proviennent de mines à grisou dégagent de l'hydrogène

carboné; celles qui proviennent de mines où il n'y a point de grisou n'en dégagent point; les gaz qu'elles donnent consistent principalement en azote.

Cette dernière conséquence est curieuse, elle donne à l'ingénieur des mines un moyen de reconnaître *a priori* si la veine dont il va commencer l'exploitation produira du grisou.

Il était naturel de penser, d'après les faits que je viens d'exposer, que certaines houilles, sinon toutes les houilles, perdaient quelques-uns de leurs principes par leur exposition à l'air; c'est ce que l'expérience est venue confirmer.

On sait que dans les mines à grisou le gaz se dégage de la houille; c'est dans les déblais souvent que la production de gaz est la plus abondante.

J'ai mis en évidence le dégagement spontané du gaz hydrogène carboné de la manière suivante:

Deux gros morceaux de houille de Bellevue, extraits depuis six jours environ et arrivés directement de la fosse, ont été pulvérisés rapidement; la poussière a été placée dans un grand vase que l'on a recouvert d'une cloche de forme conique; au bout de 12 heures, en enlevant la cloche, approchant une allumette enflammée et renversant, il se produisait une flamme longue et éclairante.

J'ai répété l'expérience avec le même succès sur des charbons de Ferrand et de l'Agrappe (bassin de Mons).

Quand ces charbons avaient été plusieurs jours exposés à l'air, il ne se dégageait plus de gaz inflammable.

Quand cette exposition dure plusieurs mois, on ne retire plus de gaz hydrogène carboné même en chauffant la houille jusqu'à 300°.

Ainsi, 500 grammes de houille du nord du bois de Boussu, ont été réduits en poussière et laissés cinq mois exposés à l'air; au bout de ce temps, chauffés au bain d'huile jusqu'à 300°, il s'est dégagé du gaz, mais ce gaz n'était pas inflammable.

Des expériences semblables faites sur les charbons gras de Bellevue et d'Élonges ont donné le même résultat; le charbon frais donnait du gaz inflammable, le charbon vieux n'en donnait point.

Il n'y a pas seulement que le gaz hydrogène carboné qui se dégage par l'exposition à l'air; la houille perd encore en partie le principe gras qui détermine la formation du coke lors de la calcination.

Tous les fabricants de coke attachent une grande importance à n'employer que des charbons frais; ils assurent que le vieux charbon ne colle pas bien.

J'ai voulu vérifier cette assertion moi-même, et, pour cela, j'ai fait fabriquer en Belgique deux tonnes de coke avec des charbons gras de Jolimet et Roinge qui, depuis six mois, étaient restés sur le rivage; on avait eu soin de l'enfourner dans un four bien chaud placé au centre d'un groupe de fours en bonne allure; la cuisson a duré quarante-huit heures comme à l'ordinaire; elle a été conduite dans les mêmes conditions que celle des fours voisins où l'on avait enfourné des charbons frais.

Cependant le coke que l'on a obtenu était mal formé, en partie pulvérulent et trop mauvais pour être livré au commerce.

Ce résultat ne pouvait provenir que d'une chose, du départ, par l'exposition à l'air, du principe gras qui fait coller le coke.

Ce principe se dégage aussi à une température peu élevée; j'ai fait chauffer à une température inférieure à 300° des houilles grasses réduites en poudre, puis je les ai calcinées dans un creuset; elles donnaient un résidu pulvérulent. Les

mêmes houilles, calcinées sans avoir été préalablement desséchées, donnaient un coke bien formé.

Ainsi le principe gras de la houille, celui qui détermine l'agglutination de toutes les parcelles qui la composent lors de la calcination, disparaît sous l'influence d'une température de 200° à 300° ; après qu'il a disparu, la houille cesse de se coller et de se boursoufler sous l'action de la chaleur.

La pression atmosphérique influe-t-elle sur le dégagement du grisou ? est-il plus rapide lorsque le baromètre baisse, moins abondant et rapide lorsqu'il monte ? La plupart des ingénieurs qui dirigent les mines où il y a du grisou, croient à l'influence de la pression atmosphérique sur le dégagement du gaz. Il est certain que lorsque le temps est lourd et orageux, le gaz paraît en plus grande abondance dans la veine que quand le temps est beau ; mais cela peut tenir à ce que les moyens de ventilation, ventilateur ou foyer d'aérage, sont affectés par les variations atmosphériques et n'agissent plus avec la même puissance. Je n'ai point cherché à résoudre cette question, mais j'ai voulu m'assurer si le gaz hydrogène carboné se dégage, quelle que soit la pression de l'atmosphère ambiant.

Voici l'expérience que j'ai faite :

J'ai mis dans un vase de forme cylindrique en cuivre 20 kilogrammes de charbon menu de l'Agrappe provenant de gros morceaux fraîchement sortis de la fosse et pulvérisés rapidement ; puis j'ai hermétiquement fermé le vase, et, à l'aide d'une pompe de pression, refoulé de l'air à l'intérieur jusqu'à ce que la pression atteignit cinq atmosphères ; un robinet était placé à la partie supérieure du vase ; on avait la précaution de l'ouvrir un instant et de laisser échapper quelques litres d'air afin de faire partir le gaz hydrogène carboné qui aurait pu se dégager lors de l'introduction du charbon menu.

Ce même robinet servait à recueillir du gaz ; vingt-quatre heures après l'introduction du charbon menu, le gaz recueilli brûlait au contact d'un corps allumé ; c'était de l'hydrogène carboné. L'expérience fut répétée sur plusieurs litres recueillis successivement et donna toujours le même résultat.

Ainsi une pression de cinq atmosphères n'empêche pas le dégagement du grisou ; peut-être l'augmentation de pression a-t-elle pour effet de rendre le dégagement moins rapide ; mais on ne saurait l'affirmer ; ce qui est positif, c'est qu'elle ne l'empêche pas.

Les charbons provenant de mines où il n'y a point de grisou subissent-ils quelque perte par leur exposition à l'air ? Il est possible qu'ils laissent dégager spontanément des gaz, tels que l'azote et l'acide carbonique ; s'il en était ainsi, plus de soin devrait être apporté à l'aérage de beaucoup de mines dans lesquelles il il est négligé au grand détriment de la santé des classes ouvrières ; il serait même du devoir de l'administration d'intervenir et de prescrire l'emploi des mesures efficaces.

Des faits que nous venons d'exposer on peut déduire les conclusions suivantes :

1° La houille éprouve, par une dessiccation à la température de 100° et au-dessus, une perte supérieure à celle qu'elle subit dans le vide sec ; avec l'élévation de température la perte augmente.

2° Sous l'influence d'une température comprise entre 50° et 330°, la houille subit une véritable décomposition, elle dégage des gaz, de l'eau et des huiles carbonées dont la proportion s'élève de 1 à 2 p. 100 ; la perte augmente avec l'élévation de température ; ce qu'il y a de remarquable, c'est qu'à une tempé-

rature de 200° à 300° la houille perd complétement le principe gras qui détermine la formation du coke lors de la calcination.

3° Les gaz dégagés par les houilles provenant de mines à grisou consistent principalement en hydrogène carboné; ceux dégagés par les houilles provenant de mines où il n'y a pas de grisou, consistent principalement en azote et ne sont pas inflammables.

De là un moyen de reconnaître *a priori* si une veine de houille est susceptible de donner du grisou.

4° Les houilles provenant de mines à grisou s'altèrent par l'exposition à l'air; elles perdent de l'hydrogène carboné et une partie, sinon la totalité, du principe gras qui détermine la formation du coke lors de la calcination; elles se délitent souvent et tombent en poussière.

5° Le gaz hydrogène carboné se dégage lors même que la pression de l'atmosphère ambiant est quintuple de la pression atmosphérique.

De la classification des houilles. — Nous avons vu en tête de cette étude, que la classification des houilles repose sur un caractère particulier : la manière dont la houille se comporte pendant la combustion, et nous avons reconnu trois espèces de houilles qui sont : 1° la houille sèche, ne donnant pas de flamme et ne se collant pas ; 2° la houille grasse, appelée aussi houille maréchale, qui est collante et donne de la flamme; 3° la houille maigre, à longue flamme, non collante et donnant un coke pulvérulent.

Au premier abord, cette classification est artificielle puisqu'elle ne repose que sur un caractère, et qu'une classification naturelle doit embrasser et comparer tous les caractères à la fois. Or il se trouve que la classification artificielle répond parfaitement à l'ensemble des caractères des différentes houilles, et en somme c'est une classification naturelle.

Voici la composition donnée par M. de Marsilly pour les trois classes de houilles.

1° HOUILLES SÈCHES

Proportion d'hydrogène.	3,72 à 4,17
Proportion de carbone total.. . . .	90,36 à 93,44
Proportion d'oxygène et d'azote. . .	2,70 à 5,68
Proportion de carbone fixe.	89,28 à 93,25

(N'existant pas à l'état de combinaison).

2° HOUILLES GRASSES

Proportion d'hydrogène..	4,68 à 5,11
Proportion de carbone total.. . . .	87,30 à 90,49
Proportion d'oxygène et d'azote. . .	4,73 à 7,55
Proportion de carbone fixe.	74,36 à 83,86

3° HOUILLES A LONGUE FLAMME

Proportion d'hydrogène..	5,21 à 5,80
Proportion de carbone total.. . . .	83,33 à 85,27
Proportion d'oxygène et d'azote. . .	9,87 à 11,01
Proportion de carbone fixe.	61,01 à 66,37

On voit d'après cela que la composition chimique est bien en rapport avec la manière dont les houilles se comportent pendant la combustion.

Les houilles sèches contiennent une faible proportion de gaz hydrogène, oxygène et azote, et cette proportion va en augmentant considérablement d'une

classe à l'autre ; l'accroissement de l'oxygène et de l'azote est surtout sensible. Les houilles sèches renferment plus de carbone que les autres.

Dans certains cas cependant, les houilles grasses se rapprochent des houilles sèches par la teneur en carbone ; mais la distinction se rétablit si l'on remarque que la différence entre le carbone total et le carbone fixe va sans cesse en augmentant ; cette différence représente le carbone combiné, c'est-à-dire les carbures gazeux ou liquides, mais toujours volatils que renferme la houille.

La proportion de carbone combiné est surtout considérable dans les houilles à longue flamme, ce qui ne nous étonnera pas, si nous nous rappelons que ces houilles servent à préparer le gaz d'éclairage et qu'elles dégagent en même temps que ce gaz des goudrons, de l'acide acétique, des composés ammoniacaux.

La classification que nous venons de trouver bonne au point de vue chimique ne l'est pas moins au point de vue du gisement; les houilles grasses se trouvent toujours entre les houilles sèches et les houilles à longue flamme, celles-ci sont donc les moins anciennes, et les premières sont les plus anciennes. Cette différence d'âge fait comprendre la différence de composition chimique : en effet, la carbonisation augmente avec le temps, à mesure que les produits volatils disparaissent.

Densité. — La densité des houilles est très-variable, on le comprend; elle oscille entre 1,1 et 1,5, et la houille la plus communément répandue a pour densité un nombre voisin de 1,3 ; pour les houilles anthraciteuses, la densité dépasse 1,5, et pour l'anthracite elle arrive à 2,2.

Comme la houille est toujours employée en morceaux, le poids du mètre cube ne se déduit pas de la densité, et ce poids varie entre 750 et 1,000 kilogrammes. Les houilles en petits morceaux sont toujours plus lourdes que les autres, et il y a avantage à les acheter à la mesure ; au contraire, il vaut mieux acheter au poids les houilles en gros morceaux.

Cette considération du poids ne doit pas être négligée, par exemple lorsqu'il s'agit de donner à un grand navire sa provision de charbon.

Lignites. — Les lignites sont des combustibles fossiles postérieurs à la formation de la craie et antérieurs à l'époque actuelle. On voit d'après cette définition que les lignites peuvent avoir des âges très-différents, et par suite des caractères très-différents aussi.

Les uns sont homogènes, d'un noir foncé, semblables à la houille ; d'autres ont conservé la forme et l'aspect des tissus végétaux dont ils sont formés, et parmi ces derniers, les uns sont noirs et constituent le jayet, les autres sont brun marron et constituent les bois bitumineux.

Les principaux gisements de lignites existent dans le Tyrol, dans la Carinthie, en Autriche, dans la Bohême et la Saxe, et dans la Hesse rhénane. On en rencontre en France entre Aix et Toulon, et aux environs de Soissons.

Les couches de lignite sont en général peu larges et très-profondes. Elles sont formées par des arbres entremêlés.

Le cube extrait annuellement en Europe peut être évalué à cinq millions de tonnes environ.

Formation des lignites. — La formation des lignites est analogue à celle de la houille; elle est due à une carbonisation lente d'arbres et de végétaux. Mais ici l'explication, que nous n'avons pas reconnue admissible pour la houille, pourrait bien être vraie ; les lignites peuvent avoir été formés en plus d'un point par l'engloutissement au fond des eaux de ces radeaux énormes d'arbres entrelacés que les grands fleuves comme ceux de l'Amérique emportent jusqu'à la mer.

Ces arbres humectés s'alourdissent et finissent par descendre au fond de la mer où ils se décomposent lentement, sans perdre leur forme primitive.

Dans les lignites, ce ne sont plus, comme dans la houille, des végétaux d'ordre inférieur que l'on rencontre : ce sont de véritables arbres analogues à nos espèces (peupliers, saules, sapins) ; ils s'en distinguent toutefois par la grandeur de leurs dimensions. Leurs diamètres sont considérables, on en connaît qui atteignent 4 mètres ; les cercles, qui marquent l'âge et qui correspondent chacun à une saison de végétation active, se comptent par milliers. Les arbres de nos jours prennent chaque année un nouveau cercle ; il est probable qu'autrefois le cycle des saisons était moins long que notre année actuelle, et que la croissance des végétaux était plus active.

Composition chimique. — Elle est variable suivant l'âge des lignites, et aussi suivant l'essence des arbres, suivant la nature des matières minérales qui se sont déposées dans la masse poreuse.

Voici quelques analyses de lignites :

	CARBONE	HYDROGÈNE	OXYGÈNE ET AZOTE	CENDRES
Lignite anthraciteux de Hesse.	75,49	4,12	13,11	7,27
Lignite ordinaire de Hesse.	63,78	5,12	27,67	3,42
Lignite des Bouches-du-Rhône..	63,01	4,58	18,98	13,43
Lignite des Basses-Alpes.	69,05	5,20	22,74	3,01
VOICI LA MOYENNE DE NOMBREUSES ANALYSES :				
Lignites, cendres déduites.	66,53	5,58	27,89	»
Lignites avec leurs cendres.	60,50	5,08	25,56	9,05
Ou en nombres ronds.	60,00	5,00	26,00	9,00

Ici encore, nous vérifions les principes reconnus vrais dans la classification des houilles, et posés par M. Regnault :

1° La richesse en carbone augmente à mesure que les combustibles appartiennent à des terrains plus anciens ;

2° La richesse en oxygène suit une marche inverse, et augmente à mesure que l'on considère des terrains plus jeunes.

Cela veut dire que la composition des combustibles minéraux se rapproche d'autant plus de celle du bois qu'ils appartiennent à des terrains moins anciens, et cela nous explique pourquoi les lignites sont moins riches en carbone et plus riches en oxygène que les houilles.

Les lignites, au moment de leur extraction, renferment de 30 à 40 pour 100 d'eau ; desséchés à l'air, ils finissent par n'en plus retenir que 8 pour 100.

Les lignites s'enflamment bien plus facilement que la houille, et cela se comprend puisqu'ils se rapprochent plus qu'elle du bois ; ils donnent de la flamme avant d'atteindre le rouge, et dégagent en brûlant une odeur acide et bitumineuse,

due à l'acide pyroligneux. Ils ne fondent pas et ne s'agglutinent point ; à la distillation, ils donnent du gaz, de l'eau, des huiles, de l'acide pyroligneux.

Certains lignites se rapprochent de la houille ; on les en distingue par ce fait que la houille qui ne donne plus de flamme se recouvre d'une pellicule blanche et s'éteint, tandis que le lignite se recouvre bien de la même pellicule, mais continue à brûler comme la braise.

Le lignite est donc employé comme combustible; les échantillons qu'on appelle bois bitumineux servent en ébénisterie, et le jayet ou jais, qui est susceptible de recevoir un beau poli, est employé comme ornement et comme parure.

Tourbe. — Depuis l'antiquité, la tourbe a été employée comme combustible dans quelques pays pauvres, et cela devait être puisqu'on la trouve à la surface du sol.

Toutes les fois qu'un pays est marécageux, quelquefois même lorsqu'il est sableux et qu'une nappe d'eau se trouve à peu de profondeur au-dessous du sol, si en outre le climat est tempéré, il se développe dans ce pays une végétation puissante. Elle se compose non point d'arbres de haute taille, mais des végétaux les plus simples comme organisation, par exemple des mousses et des roseaux. Personne n'ignore combien l'humidité est favorable au développement de la vie végétale ; aussi les plantes des marais prennent-elles une croissance rapide, puis elles meurent, et leurs débris forment une couche charbonneuse que viennent successivement augmenter de nouvelles dépouilles.

La carbonisation est lente et s'accentue à mesure que dans une tourbière on attaque des couches plus profondes.

La couche superficielle est très-légère, c'est une espèce de feutrage jaune brun avec des débris très-nets (1 mètre cube de cette couche peut ne peser que 350 kilogrammes). Plus profondément, on rencontre des couches plus terreuses, plus noires et plus lourdes, parsemées encore de débris végétaux; mais ces débris sont uniquement formés des parties résistantes telles que les racines d'arbres ; il semblent encore frais et parfaitement conservés, mais ils s'altèrent rapidement à l'air et deviennent cassants. Enfin, en descendant plus profondément encore, on arrive à des couches formées d'une masse noire, homogène, susceptible de recevoir un beau poli, et assez lourde pour peser quelquefois 1,200 kilogrammes le mètre cube.

La tourbe se forme encore de nos jours, puisque les mêmes causes de formation existent toujours, et l'on estime que, suivant les cas, la hauteur de la couche qui prend naissance en un siècle est comprise entre 1 et 25 mètres.

Extraction de la tourbe. — Cette extraction se fait très-simplement, soit au moyen de la bêche ou louchet, soit au moyen de la drague.

Le louchet ne peut s'employer que dans les tourbières non couvertes par les eaux ; sinon, il faut au préalable dessécher le marécage au moyen de fossés convenablement combinés. Un ouvrier muni d'un louchet découpe la houille en tranches verticales, et un autre ouvrier fait apparaître la face horizontale ; on détache de la sorte des briquettes que l'on transporte et que l'on dessèche à l'air.

La tourbe une fois enlevée, et les moyens de dessèchement perfectionnés, on obtient un terrain fertile que l'on peut rendre à l'agriculture. C'est ainsi qu'on a vu s'élever des villages florissants là où s'étendaient autrefois des marécages funestes.

En Hollande, le dessèchement de certains marais n'est pas toujours commode, et on recourt à la drague pour l'exploitation des tourbières.

Ces vieux procédés d'exploitation sont défectueux en ce sens que les briquettes

obtenues sont souvent de densité très-faible, et par suite il faut un gros volume pour avoir peu de combustible utile ; de plus, la dessiccation à l'air est très-difficile, elle est irrégulière, la tourbe se fendille, se pulvérise, et sur les grilles des foyers produit un très-mauvais effet.

Devant les besoins toujours croissants, il a fallu chercher d'autres méthodes : on a inventé des machines, analogues à celles qui servent à fabriquer les briques ; ces machines prennent la tourbe, la moulent et la compriment, de manière à chasser à peu près l'eau contenue et à augmenter la densité dans de fortes proportions.

A cette opération, il y a un obstacle sérieux : c'est que la tourbe est parsemée de débris résistants qui s'opposent à une compression uniforme. En résumé, pour que les machines précédentes réussissent, il faut délayer la tourbe dans l'eau, de manière à en faire une bouillie claire ; les parties solides tombent au fond, la vase tourbeuse est décantée dans d'autres bassins où elle se dépose et où on la prend pour la transformer en briquettes.

Les méthodes de compression attendent encore de sérieux perfectionnements ; quoi qu'il en soit, on arrive ainsi à un prix de revient d'environ 12 francs la tonne pour la tourbe mise en briquettes. Pour arriver à une dessiccation convenable, on a été forcé de recourir à l'emploi de fours spéciaux.

Composition de la tourbe. — M. de Marsilly a fait une étude complète de la tourbe au point de vue chimique.

La tourbe subit à 100° une véritable décomposition ; ce n'est point seulement de l'eau qu'elle dégage, mais encore des produits carbonés qui se trouvent perdus pour la combustion ; de sorte que, pour analyser des tourbes, il ne faut pas les dessécher à la chaleur, mais simplement dans le vide sec.

La quantité d'eau perdue dans le vide sec peut varier de 2 à 8 pour 100, suivant que l'on expérimente une tourbe noire, compacte, ancienne, ou une tourbe grise, mousseuse, de formation récente.

Dans une étuve à 100°, la perte au contraire varie de 12 à 20 pour 100. Voici quelques analyses de tourbes :

	HYDROGÈNE	CARBONE	OXYGÈNE ET AZOTE	CENDRES
Tourbe noire de Bresle (Oise), 1re qualité.	7,16	47,78	36,06	9,00
Tourbe mousseuse de Bresle, 2e qualité. . .	5,65	46,80	41,15	6,40
Tourbe noire mousseuse de Thésy, 2e qual.	5,79	43,65	36,66	14,00
Tourbe blanche moderne de Remiencourt.	2,22	12,99	19,71	65,08

Là encore, nous vérifions la remarque déjà faite plusieurs fois que la proportion de carbone est d'autant moindre que le terrain est plus jeune et que la proportion d'oxygène suit une marche inverse.

Le pouvoir calorifique de la tourbe est donc bien moins élevé que celui de la houille. Si l'on tient compte des cendres et de l'eau, on trouve que la tourbe donne moitié moins de calories que les houilles grasses.

La proportion d'azote varie de 2 à 2,5 pour 100 ; elle est double de celle que renferme la houille.

En desséchant la tourbe à 100°, on perd une partie des principes combustibles, mais on obtient un combustible dont le pouvoir calorifique est plus élevé. L'accroissement de ce pouvoir calorifique doit tout au plus balancer la perte subie.

Pour terminer, nous dirons qu'en principe, il n'y a avantage à brûler de la tourbe pour le chauffage des chaudières à vapeur qu'autant que la tonne de tourbe coûte moitié moins que la tonne de houille ordinaire.

Combustibles préparés industriellement. — Agglomération des houilles. Dans toutes les mines, l'exploitation des diverses assises donne naissance à une quantité considérable de menus, que l'on ne peut utiliser directement dans les foyers, car la combustion ne se propage pas dans leur masse. On a tiré un excellent parti de ces débris en les agglomérant, c'est-à-dire en les réunissant en briquettes au moyen d'un ciment.

Cette méthode, qu'on regardait comme un expédient, est devenue ensuite un procédé fort utile pour fabriquer des combustibles ayant telle ou telle propriété ; on y arrive en mélangeant convenablement des menus de diverses provenances, et ces menus peuvent être débarrassés à l'avance par des lavages méthodiques des matières étrangères qu'ils renferment.

Lorsque parmi les menus, il en est qui appartiennent à des charbons collants, on peut, en se servant de moules portés à une température élevée, agglomérer directement tous les débris, et on évite ainsi l'inconvénient d'un ciment coûteux et quelquefois nuisible. Ce procédé direct n'a pas réussi jusqu'ici dans la pratique.

Le ciment le plus anciennement répandu est la terre glaise : on délaye les menus avec un 1/10 de leur poids de terre glaise, et on en fait des briquettes. Mais il est clair que c'est là un mauvais combustible donnant jusqu'à 20 p. 100 de cendres, et qui ne saurait guère convenir qu'aux usages domestiques.

En 1833, on eut l'idée d'employer comme ciment le goudron de houille, et l'on obtint de la sorte d'excellents combustibles; mais les briquettes ainsi formées ne sont pas solides et répandent une odeur désagréable. L'odeur et la désagrégation tiennent à la même cause, le dégagement des substances volatiles du goudron; on évite ces inconvénients en employant le brai gras, c'est-à-dire le goudron débarrassé de 25 p. 100 de matières volatiles. Enfin, plus récemment, on a recouru au brai sec, c'est-à-dire au goudron débarrassé par une température de 300° de toutes les substances volatiles qu'il renferme.

En France, la fabrication annuelle des agglomérés est de plus de 650,000 tonnes; malheureusement, la fabrication du goudron est limitée par la fabrication du gaz, et l'agglomération ne pourra se développer beaucoup que si l'on trouve un nouveau ciment ou une nouvelle méthode de compression.

Les bons agglomérés doivent être sonores et homogènes, peu hygrométriques, ils doivent brûler avec une flamme vive et claire sans se désagréger, en ne produisant qu'une fumée grise peu intense. Ils ne doivent pas donner plus de 10 p. 100 de cendres. Dans ces conditions, ils sont préférables aux bons charbons ordinaires. Le prix de revient d'une tonne d'agglomérés est en Belgique de 13 francs, à Paris de 25 francs, pour la Compagnie de l'Ouest de 26 francs et à Bordeaux de 29 francs.

Coke. — Comme le bois, en se débarrassant de ses produits volatils, donne un combustible formé de carbone plus ou moins pur, de même la houille dis-

tillée abandonne ses huiles, ses carbures et ses gaz pour donner un charbon plus pur, appelé coke, et que l'on commença à préparer vers le milieu du dix-huitième siècle, lorsqu'il fallut substituer le charbon de terre au charbon de bois dans l'intérieur des hauts fourneaux.

Le coke possède une puissance calorifique supérieure à celle de la houille, et de plus il est débarrassé en grande partie des impuretés, des cendres et surtout du soufre, qui rendent la houille impropre au travail du fer.

Nous avons vu que les houilles non collantes ne s'agglutinent pas, et quelques-unes, au contraire, se délitent par la combustion; les morceaux de houille collante sont seuls aptes à donner du coke convenable, parce qu'ils se soudent sous l'influence d'une température élevée et donnent des morceaux d'un gros volume.

RENDEMENT EN COKE DE DIVERSES HOUILLES

Lancashire	52 à 62	p. 100.
Newcastle	51 à 63	—
Houille grasse de Mons	68 à 71	—
Houille d'Alais	78	—
Houille de Blanzy	56	—
Houilles grasses de Charleroi	79 à 83	—
Houilles maigres de Charleroi	87 à 92	—
Houilles grasses de Valenciennes	66 à 75	—
Houille de Decazeville	60	—
Houille de Commentry	62	—

Si l'on préparait le coke avec la houille telle qu'on l'extrait, toutes les matières minérales de celle-ci se retrouveraient dans celui-là, et, comme la proportion de cendres pour le coke ne doit pas dépasser 8 p. 100, il en résulterait que le coke ne serait pas commode à employer. On a remédié à cet inconvénient en lavant la houille au milieu d'un courant d'eau dans un grand réservoir; les substances minérales qu'elle renferme ont, en général, une densité bien supérieure à la sienne, et elles se trouvent mécaniquement entraînées au fond des réservoirs. Les charbons les plus purs se maintiennent à la surface, et donnent le meilleur coke. Le lavage de la houille est presque toujours précédé d'un broyage mécanique.

Par ces procédés, on enlève à la houille jusqu'à 6 p. 100 des matières minérales qui se seraient retrouvées dans les cendres du coke.

La houille, ainsi préparée, est distillée dans des fours de forme très-variable.

Le coke obtenu n'est point du carbone pur; il en renferme une proportion un peu supérieure à 90 p. 100, avec 3 p. 100 de gaz (hydrogène, oxygène, azote) et 7 p. 100 de cendres.

CHAPITRE IV

ROCHES

Composition et caractères des roches principales : granites, gneiss, schistes, porphyres, trachytes, basaltes, laves. — Calcaires, dolomies, brèches, poudingues, conglomérats, argiles, marnes, sables. — Modes divers de formation des roches.

COMPOSITION ET CARACTÈRES DES ROCHES PRINCIPALES

Granites. — Les granites sont des roches composées, formées du mélange de trois minéraux précédemment étudiés : le quartz, le mica et le feldspath.

La structure d'agrégation de cette roche, c'est-à-dire la manière dont ses divers éléments sont agrégés les uns aux autres, est caractéristique ; la structure granitoïde est donc celle des roches formées de plusieurs minéraux associés à peu près dans les mêmes proportions.

Dans le granite, il est rare de rencontrer le quartz sous une forme cristalline bien définie ; il est presque toujours en grains. Généralement, ce quartz est blanc, et ses cristaux, quand il y en a, sont transparents et incolores ; quelquefois, cependant, ces cristaux affectent la teinte jaune du quartz enfumé, c'est-à-dire du quartz sali par des émanations bitumineuses.

Le mica est en lamelles caractéristiques ; il est facile avec un couteau d'enlever à ces lamelles d'autres lamelles brillantes, minces et élastiques. Le mica a toujours un éclat métallique, avec une couleur blanchâtre, noire ou verte ; ces teintes peuvent être mélangées dans le même morceau de granite.

Le feldspath est généralement sous une forme lamelleuse, quelquefois grenue, et alors le granite est à grains fins. Cependant on rencontre certains échantillons possédant du feldspath en gros cristaux d'un centimètre de long, donnant au granite la structure d'agrégation porphyroïde (l'apparence porphyroïde est celle d'une roche qui, comme le porphyre, est formée de gros cristaux se détachant sur une pâte homogène). Il y a souvent dans un même granite deux feldspaths mélangés ; c'est ainsi qu'on peut y rencontrer à la fois un feldspath rose (orthose) et un feldspath blanc verdâtre (albite ou oligoclase).

Le granite est une roche à éléments très-durs, mais elle se brise facilement ; et il est facile d'en enlever des éclats avec un marteau ; on peut l'employer avantageusement pour les chaussées d'empierrement. C'est une excellente pierre de taille ; cependant il ne faut pas s'en exagérer la durée. On trouve certains granites en état de décomposition plus ou moins avancée. Quelques-uns même finissent par se transformer en kaolin. Cette transformation se rencontre fréquemment dans le centre de la France, on ne la trouve point dans les Alpes.

Variétés de granite. Protogine. — Le granite peut voir son mica remplacé par un minéral pailleté, vert, le talc ou la chlorite et prend alors le nom de protogine. La protogine présente les structures d'agrégation les plus variées, de-

puis la structure granitoïdé jusqu'à la structure porphyrique. Le mont Blanc et les aiguilles voisines sont formées de protogine; il en est de même des montagnes du Creusot. La protogine a dû apparaître sur le sol un peu après la période houillère; en effet, les masses éruptives qui en sont formées ont relevé sur leurs flancs les couches carbonifères, tandis que les couches postérieures se sont déposées horizontalement dans les cuvettes formées par l'éruption et gardent encore aujourd'hui leurs faces horizontales; si ces couches avaient existé au moment où la protogine est apparue, il est clair qu'elles auraient suivi le mouvement et qu'on les retrouverait aujourd'hui épousant le flanc des montagnes. Les terrains houillers voisins de la protogine ont été soumis au métamorphisme. Dans la protogine, on rencontre des masses plus ou moins résistantes; les noyaux résistants sont moins altérés que les autres par les influences atmosphériques, et ils restent debout, soit sous forme d'aiguilles, soit sous forme de pierres ovoïdes, qui, quelquefois, constituent les pierres branlantes.

Syénite. — La syénite est un granite bien connu dans l'antiquité; son nom vient de la ville de Syènes qu'on trouvait dans l'ancienne Égypte; c'est dans cette roche que les Pharaons faisaient tailler leurs sphinx et leurs obélisques.

L'obélisque de la pace de la Concorde à Paris est en syénite. C'est une roche dans laquelle une grande partie du mica est remplacée par de l'amphibole. La syénite est moins âgée que le granite; elle se rencontre souvent à côté des masses granitiques; dans le massif des Vosges, les deux extrémités, Béfort et Strasbourg, sont syénitiques, tandis que la partie centrale, Colmar, est granitique. Ce qui fait de la syénite une belle pierre d'ornement, c'est sa coloration : généralement, le feldspath y est rose et l'amphibole vert foncé, ce qui produit un contraste. La syénite se désagrége plus facilement que le granite; elle se présente en masses généralement peu homogènes.

Pegmatite. — La pegmatite ou granite graphique est un granite dans lequel le quartz est en cristaux complets dont les axes sont parallèles; l'aspect de cette roche représente comme une série de caractères hébraïques, d'où le nom de granite graphique. Cette roche forme la gangue de l'étain oxydé. Dans les mines d'étain, on trouve aussi l'hyalomite, sorte de granite qui ne renferme presque point de feldspath.

En résumé, le granite est une roche cristalline formée de trois éléments et quelquefois cinq, savoir :

Du quartz, une ou deux espèces de mica, une ou deux espèces de feldspaths.

Dans le granite, on rencontre beaucoup de minéraux contemporains qui sont : la tourmaline, l'amphibole, l'étain oxydé, le triphane, le molybdène sulfuré, le corindon, les grenats, l'émeraude, la topaze, la pyrite, les fers oligiste et oxydulé, etc.

Gneiss et Schistes. — Le gneiss est une sorte de granite dans laquelle le mica domine. Les lames de mica, ordinairement disséminées d'une manière irrégulière, se sont placées dans le gneiss parallèlement à un plan, il en résulte une série de zones donnant à la roche un aspect rubanné. On explique cette formation, soit en supposant que la masse liquide en repos s'est solidifiée lentement et a permis aux lames de mica de prendre une orientation stable, soit encore en disant que la traction opérée dans les coulées pâteuses par l'action de la pesanteur, a produit comme un laminage de la roche.

Le gneiss, que l'on appelle quelquefois granite rubanné ou schisteux (schisteux vient du grec *schistos*, divisé), est toujours associé au granite et recouvre ce dernier. Le granite est comme la fondation du sol terrestre, fondation qui

repose sur les matières incandescentes de l'intérieur du globe, et le gneiss est la seconde assise, celle qui supporte les terrains de sédiment.

On trouve fréquemmennt dans les gneiss de la tourmaline, des grenats, du molybdène sulfuré, du fer oxydulé, etc.

Le granite schisteux est fréquemment employé pour les constructions, par exemple, dans le Limousin; grâce à sa structure, il est facile à débiter en blocs réguliers.

A côté du gneiss, il faut placer le gneiss talqueux; c'est une protogine dans laquelle le talc s'est disposé par bandes.

On trouve en Bretagne, près de Nantes, un gneiss feuilleté, qui contient de l'amphibole au lieu de mica; c'est une syénite schisteuse.

Nous avons donné plus haut une cause de la formation du gneiss; le plus souvent il faut considérer le gneiss comme une roche métamorphique.

En effet, le gneiss est toujours associé au granite et on passe de l'un à l'autre par gradations insensibles; ce qui prouve en outre l'action métamorphique, c'est qu'on trouve des assises de calcaire métamorphique intercalées dans les assises de gneiss.

Dans les gneiss métamorphiques, comme dans les gneiss éruptifs, on trouve du quartz du feldspath et du mica.

Lorsque le fedspath vient à disparaître, les feuilles de mica se déposent par bandes et l'on se trouve en présence d'une roche feuilletée d'origine métamorphique, qu'on appelle micaschistes. Les micaschistes sont riches en minéraux cristallisés.

Dans le gneiss, le talc remplace quelquefois le mica; la même substitution peut se faire dans les schistes et l'on obtient les talcschistes.

Les schistes, à base de mica ou de talc forment des couches considérables que l'on rencontre au-dessus des granites à la base des terrains anciens.

On observe à partir du granite, une série de roches métamorphiques, dans lesquelles l'action métamorphique a été sans cesse en décroissant: d'abord ce sont les gneiss, puis les mica et talcschistes, qui sont des roches parfaitement cristallisées; viennent ensuite les roches qu'on appelle schistes micacés ou schites talqueux, qui se séparent en feuillets plus ou moins épais, plus ou moins continus, dans lesquels la structure cristalline est moins facile à reconnaître; au-dessus on trouve les phyllades, puis les schistes ardoisiers qui se débitent en feuilles, mais dans lesquels on ne trouve plus trace de cristallisation; au-dessus encore sont les schistes argileux en feuillets mal définis et peu solides, et enfin viennent les argiles.

Il faut considérer que la masse entière, depuis le gneiss jusqu'à l'argile, était primitivement composée seulement d'argile; l'argile est une roche arénacée formée par les débris sableux que les eaux enlèvent aux roches et déposent ensuite dans les bas-fonds; la masse argileuse tout entière a été métamorphosée, mais l'effet produit a été variable suivant la distance au foyer et les couches supérieures ont pu rester à l'état argileux.

Ardoises. — Les schistes ardoisiers donnent pour la couverture des édifices des ressources précieuses; ils se débitent, plus ou moins facilement suivant la provenance, en feuillets minces, sonores et résistants, de couleur bleuâtre, que tout le monde connaît sous le nom d'ardoises.

On tire les ardoises employées en France de deux sources principales; Angers et Fumay dans les Ardennes.

L'ardoise d'Angers est d'un grain très-fin, mince et légère, elle est moins solide et plus facilement altérable que l'ardoise des Ardennes.

L'ardoise d'Angers la plus estimée est celle qu'on appelle la carrée fine ; elle est rectangulaire et mesure $0^m,30$ sur $0^m,22$ et $0^m,003$. A Angers sur le port, elle vaut 25 francs le mille, et 56 francs en place à Paris. Au-dessous vient l'ardoise dite gros noir, plus petite que la précédente ; on classe au-dessous des ardoises plus ou moins tachées, plus ou moins rousses, dont la valeur descend au-dessous de 15 francs le mille.

Les feuillets de la roche ardoisière sont presque toujours verticaux ou très-inclinés, jamais horizontaux.

On doit refuser les ardoises qui renfermeraient des pyrites ou des matières organisées, celles qui seraient assez peu compactes pour absorber l'eau, parce qu'alors elles se briseraient vite et, en outre, laisseraient pourrir la charpente qu'elles recouvrent.

La meilleure ardoise est celle qui est la plus dure et la plus pesante ; les noires sont préférables, les bleu clair sont bonnes ; celles qui sont bleu foncé sont généralement spongieuses. Une bonne ardoise plongée dans l'eau pendant vingt-quatre heures de manière à émerger en partie, ne doit pas être mouillée sur plus de $0^m,01$ par l'ascension capillaire.

Les ardoises d'Angers durent trente ans ; celles des Ardennes peuvent durer des siècles.

Les ardoises auxquelles on donne une surface polie sur laquelle on écrit ou on dessine viennent de la Suisse ; elles semblent devoir leur aspect gras à une légère proportion d'huile ou de bitume. On a cherché à les reproduire artificiellement en mélangeant du sable quartzeux, du noir de fumée et de l'huile de lin.

Diorite. — Le diorite est une roche granitoïde qui ne renferme que deux éléments : l'amphibole et le feldspath. L'amphibole est l'actinote ou la hornblende ; le feldspath est l'oligoclase ou le labrador ; les cristaux de feldspath sont blancs et ceux d'amphibole vert foncé.

Il arrive quelquefois dans cette roche que l'amphibole se dispose par rubans de manière à donner un diorite schisteux.

Les diorites ont, comme les granites, subi l'action métamorphique, et on les trouve presque toujours associés à un schiste amphibolique, qui est formé de feldspath et d'amphibole.

PORPHYRES

Nous avons dit plus haut ce qu'était la structure porphyrique. C'est celle d'une roche formée d'une pâte dans laquelle sont disséminés des cristaux plus ou moins gros.

La composition et les propriétés du porphyre varient suivant la nature de la pâte et suivant le minéral cristallisé :

1° *Porphyre feldspathique ou feldspath compacte porphyroïde.* — Ce porphyre est une pâte de feldspath renfermant des cristaux de feldspath ; il est formé d'un seul élément se présentant sous deux formes différentes. Ce sont généralement des cristaux d'oligoclase qu'on trouve dans ce porphyre. La couleur la plus commune est un rouge très-prononcé. Il arrive quelquefois que la pâte est mélangée d'un peu d'amphibole et la couleur devient verdâtre ; c'est le cas du porphyre vert antique.

2° *Porphyre quartzifère.* — Il est formé d'une pâte feldspatique renfermant des cristaux de feldspath et des grains de quartz cristallisé. Le feldspath est

tantôt de l'orthose, tantôt de l'oligoclase. La pâte est généralement rouge foncé, quelquefois brune ou grise, elle est fusible et donne un émail gris; les cristaux de feldspath sont blancs, quelquefois verdâtres ou rosés, mais toujours avec une teinte claire qui se détache nettement sur un fond sombre. L'orthose est toujours le feldspath qui domine, l'oligoclase l'accompagne quelquefois.

Le quartz est en grains cristallisés, sous forme de dodécaèdres hexagonaux; le quartz est incolore et transparent, ce qui permet de le distinguer immédiatement à la cassure; quelquefois il est enfumé.

La pâte des porphyres, dans certaines circonstances, peut devenir terreuse. Ainsi il existe des porphyres feldspathiques terreux, que l'on appelle porphyres argileux (ou *Thon-porphyr*, en allemand); ces roches sont associées au terrain de grès rouge. On trouve des porphyres quartzifères dans le même cas, par exemple, en Saxe et en Cornouailles. En Bretagne, on a trouvé des filons de porphyre décomposés et réduits à l'état d'argile; cette argile a été employée dans la construction du canal de Nantes à Brest. Les faits précédents montrent chez les porphyres une tendance assez marquée à la décomposition.

Le porphyre à pâte rouge sombre et à cristaux blancs, lorsqu'il est dur, est une des plus belles pierres que l'on connaisse; il est susceptible de recevoir un beau poli et sert alors à la décoration des édifices et à la fabrication des objets d'art. En Égypte, on connaît le porphyre rouge antique, dont les anciens faisaient des sépulcres, des baignoires, des obélisques; l'obélisque de Sixte-Quint, à Rome, est formé par un gros bloc de ce porphyre. Au Louvre, à Paris, on peut admirer des bassins et des statues en porphyre.

Ce porphyre rouge antique, qui est fort dur, résistait très-bien sous le climat peu humide de l'Égypte; mais en France, les pluies continuelles ne tardent pas à le décomposer et à l'exfollier; un sphinx rapporté d'Égypte s'est trouvé placé au Louvre sous une gouttière, il est aujourd'hui complétement dégradé et méconnaissable.

TRACHYTES

Le trachyte est une des trois principales roches volcaniques qui sont: les trachytes, les basaltes et les laves.

Les trachytes présentent, comme composition, une grande analogie avec les porphyres feldspathiques; ce sont des roches presque uniquement composées de feldspath en pâte, avec des cristaux disséminés de feldspath, d'amphibole et de mica. La pâte des trachytes est tantôt blanche, tantôt grise ou jaunâtre; elle est poreuse.

Au nombre des trachytes, il faut placer les phonolites et les obsidiennes, dont nous avons parlé en traitant du feldspath.

Le trachyte affecte quelquefois la structure granitoïde, au point que la pâte poreuse finit presque par disparaître, à cause de la multiplicité des cristaux qui sont ordinairement de l'amphibole hornblende et du mica noir.

On trouve encore certains trachytes mélangés de gros cristaux de feldspath donnant à la roche un aspect porphyroïde; cet aspect est encore plus accentué dans certains trachytes, où l'on trouve, outre les gros cristaux de feldspath, des grains quartzeux.

Le caractère du trachyte est de présenter une pâte feldspathique poreuse, quelle que soit la proportion de cristaux étrangers mélangés.

Les trachytes sont des roches éruptives qui ont paru depuis le milieu jusqu'à la fin de la période tertiaire (leur âge se détermine, comme nous l'avons déjà

dit pour les autres roches plutoniennes, par l'âge de la dernière couche sédimentaire déchirée et soulevée par le massif d'éruption).

En France, le groupe du Cantal est de formation trachytique et les montagnes hautes de 1500 mètres qu'on trouve au centre du groupe, présentent des pics élancés et escarpés tout entiers en phonolite.

Le massif du Mont-Dore, que domine le pic de Sancy, est de formation trachytique ; la masse trachytique a une épaisseur qui atteint 800 mètres.

Parmi les massifs trachytiques, nous citerons encore la chaîne du Velay, avec le pic de Mézenc, et le massif du Chimborazo dans la chaîne des Andes, en Amérique.

Les trachytes sont de bons matériaux de construction; lorsqu'ils sont durs, ils sont très-résistants à cause de leur structure poreuse. La cathédrale de Cologne est construite en belles pierres de trachyte granitoïde, que l'on trouve dans la Prusse rhénane.

BASALTE

Le basalte, qu'on a quelquefois regardé comme une roche simple, est une roche composée de labrador et de pyroxène. Elle existe quelquefois avec la structure granitoïde et l'on peut distinguer les deux minéraux cristallisés : pyroxène augite et labrador; mais, le plus souvent, c'est une masse homogène, très-résistante, d'un noir bleuâtre, renfermant les deux minéraux fondus ensemble et indistincts.

Le basalte granitoïde se rencontre accidentellement dans la masse du basalte ordinaire.

Certains basaltes, par exemple, celui de la basse Silésie, renferme, outre le pyroxène augite et le labrador, de l'eau et du fer oxydulé magnétique qu'il est facile de séparer en pulvérisant la roche et promenant un aimant dans la poussière obtenue.

C'est surtout le pyroxène qui forme la plus grande partie du basalte, on l'y trouve assez souvent en cristaux isolés. On y rencontre aussi des cristaux isolés de péridot formant des nodules d'un vert olive qui contraste avec la masse noire de la roche.

Le basalte se présente dans la nature sous des aspects fort curieux : les masses basaltiques sont généralement formées de prismes à base hexagonale accolés les uns aux autres; cela tient à ce que le basalte liquide est homogène, et qu'en se solidifiant il se contracte aussi d'une manière homogène, et se divise alors en prismes réguliers hexagonaux formant quelque chose d'analogue aux ruches d'abeilles. La figure 5 de la géologie représente ce mode de division caractéristique.

Dans le Vivarais, on trouve un exemple frappant de la formation basaltique ; du cratère de la Coupe part une longue coulée de basalte, que l'on peut suivre tout le long du flanc de la montagne, jusqu'à la base où la nappe liquide s'est étendue, puis s'est solidifiée et a produit un monceau de colonnes prismatiques accolées.

En d'autres endroits, le basalte est venu de l'intérieur en filons puissants, qui, quelquefois, sont arrivés jusqu'au jour et se sont épanchés sur le sol de manière à former des plateaux basaltiques, ou bien encore de véritables montagnes qui sont comme la tête d'un champignon dont la tige descend dans la terre. On reconnait bien par ces exemples que le basalte est d'origine ignée et qu'il a été

poussé de l'intérieur du globe à l'extérieur; et, d'ailleurs, les terres voisines du basalte sont toujours métamorphisées et leurs fossiles charbonnés. Dans les basaltes en nappe, la partie inférieure qui touche au filon est prismatique, et la partie supérieure, au contraire, forme un plateau scoriacé, poreux, très-irrégulièrement divisé. Imaginez maintenant que des courants liquides enlèvent les couches peu résistantes que le basalte a traversées, il pourra rester une sorte de colonnade prismatique supportant le chapeau poreux et scoriacé dont nous parlions plus haut.

C'est ainsi qu'on s'explique l'aspect de la grotte de Fingal, que l'on trouve en pleine mer sur les côtes d'Irlande, et de la grotte des Fromages, que l'on connaît entre Cologne et Coblentz. Dans cette dernière, les colonnes se sont divisées horizontalement et forment une série de prismes superposés; les arêtes de ces prismes se sont émoussées et ils ont quelque ressemblance avec des fromages empilés.

En fait d'accumulation de basalte, citons encore la chaussée des géants, que nous trouvons dans l'Ardèche sur les bords d'une petite rivière.

Le basalte fournit d'excellents matériaux de construction; ces prismes sont tout taillés, par exemple, pour faire des pavés, puisque leurs hexagones ne laissent entre eux aucun vide. Dans le Vivarais on en a fait des bornes kilométriques très-convenables; le basalte fournit encore de bons cailloux pour l'empierrement.

LAVES

Les laves composent une famille de roches, voisines tantôt des trachytes, tantôt des basaltes; ce sont les déjections des volcans de l'époque moderne. Les plus anciennes appartiennent, en France, aux volcans situés en Auvergne, dans le Velay et dans le Vivarais; ces volcans sont aujourd'hui éteints, mais ils sont encore parfaitement conservés, et doivent être bien postérieurs à la formation basaltique que leurs laves recouvrent. On peut dire qu'ils sont de l'époque quaternaire, bien que l'homme, par la tradition, ne mentionne pas les avoir vus en activité.

Leurs laves sont semblables à celles que vomissent les volcans actuels. Ces laves sortent du cratère liquides, portées à une haute température, et elles s'écoulent sur les flancs des montagnes; elles se refroidissent lentement, et depuis longtemps l'écorce est solide quand l'intérieur est encore pâteux. On a vu s'enflammer des bâtons que l'on plongeaient au milieu d'une coulée de laves dont l'enveloppe était froide.

Cette enveloppe présente au plus haut point la structure scoriacée : en se solidifiant, la lave se contracte, mais le liquide intérieur n'obéit pas à ce mouvement, et il en résulte des déchirements nombreux; la masse s'étire et se fendille, et les gaz qui se dégagent lui donnent, en outre, une certaine porosité.

Les laves qui se refroidissent les premières ont donc une apparence scoriacée qui les rapproche des trachytes.

D'autres se refroidissent lentement et prennent une structure compacte, ce sont les laves lithoïdes qui se rapprochent des basaltes.

Ces laves ont à peu près la composition des basaltes granitoïdes, sauf que le labrador y est remplacé par un autre silicate d'alumine.

En somme, la composition des laves est peu connue; c'est surtout par leur origine qu'on les classe.

Les laves compactes sont très-dures, et on les emploie, à Naples, comme matériaux de construction.

Les laves scoriacées, ou tufs volcaniques, broyées et pulvérisées, fournissent de précieuses pouzzolanes.

CALCAIRES — DOLOMIES

En parlant des minéraux, nous avons exposé les principales variétés de calcaires et de dolomies.

Nous avons montré que le calcaire était un carbonate de chaux affectant diverses formes.: calcaire cristallisé (spath d'Islande et arragonite), calcaire fibreux (stalactites, corail), calcaire saccharoïde (marbres), calcaire compacte (pierre à bâtir la plus employée), calcaire oolithique, calcaire terreux (craie et marne).

Les calcaires forment une grosse partie de l'écorce terrestre ; ils servent tous aux constructions d'une manière ou de l'autre ; mais ils ne sont presque jamais composés de carbonate de chaux pur et renferment, soit de l'argile, soit du quartz, soit des matières bitumineuses. Ils se présentent donc sous plusieurs aspects, dont nous nous réservons de donner la description dans la septième section de l'ouvrage qui traite de l'exécution des travaux.

Nous avons aussi rangé la dolomie parmi les minéraux, et nous en avons signalé les diverses variétés, qui se rapprochent des variétés du calcaire. Les dolomies métamorphiques sont compactes et grenues, rudes au toucher, de couleur jaunâtre ; elles sont presque toujours fendillées dans tous les sens on ne les emploie guère en construction. On a cependant tenté de faire des mortiers avec de la dolomie calcinée à la place de chaux.

ROCHES ARÉNACÉES

La masse de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère retombe en pluie et forme sur le sol des courants liquides d'une puissance variable, qui attaquent tous plus ou moins les roches qu'ils rencontrent. Les roches les plus dures sont entamées, et leurs fragments entraînés se déposent ensuite dans des eaux calmes ; il arrive qu'en plus d'un endroit, ces fragments sont agglutinés et soudés les uns aux autres par des ciments ou des pâtes de même composition chimique ou de composition différente. C'est ainsi qu'on explique la formation des roches arénacées.

A toutes les époques du globe, il exista des courants liquides plus ou moins énergiques ; de nos jours encore, nous voyons des torrents enlever aux montagnes des masses énormes de matière ; on doit donc trouver des roches arénacées dans presque tous les terrains.

La forme et la grosseur des fragments sont très-variables, et c'est ce caractère qui sert à distinguer les diverses roches.

On les appelle *brèches* quand les fragments sont anguleux ; *poudingues*, lorsque les fragments sont arrondis et ont une certaine grosseur. Les poudingues sont des pâtes renfermant des galets ou cailloux roulés. Les roches arénacées prennent le nom de grès, lorsque les fragments sont à l'état de petits grains.

Enfin, il existe une roche d'apparence homogène et compacte, qui cependant est arénacée ; c'est l'argile, formée d'éléments ténus, sorte de vase fossile, abandonnée par les eaux troubles qui avaient déposé d'abord les gros fragments, qui ne se tiennent pas en suspension. Les argiles comprimées par les couches posté-

rieures ont pris, dans certains cas, une solidité très-grande ; d'autrefois, des influences métamorphiques leur ont donné un aspect schisteux, et elles constituent alors les schistes argileux.

Parmi les roches arénacées, il faut placer encore les *conglomérats*. Une roche en fusion, poussée de l'intérieur du globe, a rencontré sur son passage une roche fissurée, à laquelle le courant a enlevé de nombreux fragments ; ces fragments, à force de rouler, se sont arrondis et sont restés dans la pâte solidifiée. Cette pâte est souvent composée de trachyte ou de basalte, et la roche s'appelle conglomérat trachytique ou basaltique. La soudure entre la pâte et les fragments est quelquefois parfaite, à ce point qu'on ne distingue pas de solution de continuité, et qu'on passe insensiblement de la pâte porphyrique aux fragments englobés ; le grès rouge est un exemple très-net de cette disposition. Il arrive fréquemment que la pâte et les fragments sont de même composition ; ainsi, dans le Cantal, les conglomérats trachytiques ont été formés par du trachyte en fusion qui a entraîné du trachyte déjà solidifié.

Les roches arénacées se ressemblent beaucoup, bien qu'appartenant à des étages souvent très-éloignés, et cela se conçoit, puisqu'elles ont été formées par les mêmes procédés mécaniques ; elles peuvent donc se ressembler, bien que ne renfermant pas les mêmes éléments. C'est ainsi que des grès d'un âge bien différent peuvent offrir le même aspect. Quand on veut les étudier et les classer, la méthode la plus simple est de les prendre par rang d'âge.

Dans les terrains de transition, on trouve : 1° la brèche universelle, composée de fragments de roches anciennes, porphyre, granite, etc., reliés par une pâte feldspathique compacte ou pétrosilex ; on la tire d'Égypte, et c'est une pierre d'ornement ; 2° la grauwacke, roche grise, comme l'indique son nom, est composée de fragments de roches anciennes agglutinés par un schiste argileux ou par de l'argile. Quelquefois, par l'effet de quelque cause étrangère, la pâte argileuse s'est trouvée remplacée par une autre d'apparence feldspathique, quelquefois même par un schiste talqueux ou micacé. Les fragments sont le plus ordinairement des galets très-petits (granite, porphyre, quartz, etc.), et alors la grauwacke est dite à grains fins ; parfois, cependant, les galets sont assez gros pour que la grauwacke devienne un poudingue. Dans certains cas, les fragments de mica dominent, et comme ils sont lamelleux, ils se sont déposés dans le liquide en couches horizontales, ce qui donne à la roche une texture feuilletée ; c'est alors de la grauwacke schisteuse.

Dans le terrain houiller on trouve une belle couche de grès formée aux dépens des roches anciennes ; il contient beaucoup de galets siliceux réunis par un ciment argileux, et quelquefois très-riche en mica. Le grès houiller prend dans certains cas le nom de granite recomposé, parce qu'il est formé de grains de granite ; il contient beaucoup de mica, et, lorsque ce minéral a pu s'orienter, il s'est disposé par couches et donne au grès la structure d'un schiste micacé. Pour distinguer ces grès des véritables schistes micacés appartenant aux terrains anciens, il faut remarquer que, dans les grès schisteux, le mica ne miroite que dans le plan de stratification ; au contraire, dans le vrai schiste micacé, le mica est disséminé partout et miroite dans toutes les directions. Le grès houiller ressemble à la grauwacke, mais le ciment est beaucoup moins solide, parce qu'il est argileux. Le grès houiller passe insensiblement à des schistes argileux et à des argiles ressemblant à des grès à grains fins. Quand le grès houiller est à grains fins et que la pâte est résistante, on peut en tirer de belles pierres de construction.

Au-dessus du grès houiller, on trouve le grès rouge, composé d'un ciment mar-

neux et sablonneux, coloré par de l'oxyde rouge de fer, englobant des galets de quartz hyalin. Il est souvent associé à des porphyres, qui sont entrés dans la pâte, de sorte qu'on peut dire que ce grès est à pâte porphyrique.

Vient ensuite le grès bigarré ; il est à grains fins, renfermant quelques noyaux de quartz, avec un ciment sablonneux et ferrugineux, lequel passe du rouge au vert dans un même échantillon ; de là vient le nom de grès bigarré.

Dans le lias, vient un grès formé de grains siliceux réunis par un ciment argileux blanchâtre ; il est employé comme pierre de taille.

Le grès vert est à la base des terrains crétacés ; il est parsemé d'une multitude de points verts qui sont dus à du silicate de fer ; ces grains ressemblent à de la chlorite, on a donné au grès vert le nom impropre de grès chlorité. On l'appelle aussi tuffau ou craie tuffau.

Le grès vert est composé de grains siliceux réunis par un ciment calcaire, et quelquefois aussi par un ciment siliceux.

Dans les terrains tertiaires, existent de nombreuses couches de grès formées de grains siliceux et de ciment argileux ; quelquefois ils se transforment en sables siliceux sans aucune cohésion. Ces couches se rencontrent à la hauteur de l'argile plastique et du calcaire grossier. Dans beaucoup de cas, les grès tournent ainsi au sable ; le sable est une roche composée de grains durs arrachés à d'autres roches et non reliés par un ciment ; les sables n'ont qu'une médiocre cohésion.

A la séparation des terrains tertiaires inférieurs et moyens (au-dessus du gypse et au-dessous du calcaire d'eau douce, dans le bassin de Paris), on trouve le grès le plus important, le grès de Fontainebleau. Il est composé de grains siliceux réunis par une pâte argileuse ou calcaire ; quelquefois cette pâte est siliceuse et alors le grès est dur et résistant, et on l'emploie au pavage.

Dans certaines régions, en Suisse par exemple, le grès de Fontainebleau est remplacé par la roche appelée molasse, qui est à pâte peu solide, et qui, quelquefois renferme de gros galets siliceux.

Comme nous l'avons dit plus haut, un grès dépourvu de ciment devient un sable ; c'est ainsi que, dans la forêt de Fontainebleau, des couches de grès se continuent par des couches de sables siliceux purs. On en trouve des couches dans beaucoup de formations, mais surtout dans les terrains tertiaires.

Certains grès durs fournissent de bonnes pierres d'appareil ; le grès bigarré a servi à construire la cathédrale de Strasbourg, et il s'est prêté au travail de la sculpture. Le grès rouge de Russie, près du lac Ladoga, est susceptible de recevoir un beau poli ; on en a fait le sarcophage de Napoléon Ier aux Invalides.

Dans le grès bigarré, on trouve quelques assises schisteuses qui fournissent des plaques minces dont on recouvre les maisons en Alsace et dans les Vosges. Les grès servent pour le pavage des rues, pour la fabrication des meules et des filtres.

Dans toutes les formations, on trouve une roche appelée brèche calcaire ; elle est formée de morceaux anguleux de calcaire reliés par un ciment calcaire, et tous ces éléments appartiennent au terrain même sur lequel repose la brèche, de sorte que la roche a pris naissance sur place.

ARGILES ET MARNES

Les argiles sont des masses plus ou moins dures, qui absorbent l'eau et deviennent onctueuses au toucher ; délayées dans l'eau, elles donnent une pâte qui durcit au feu, et qui, refroidie, happe à la langue, parce qu'elle est sillonnée

d'une masse de vaisseaux capillaires qui absorbent la salive ; les argiles ont une certaine odeur amère caractéristique.

On range sous le nom d'argile bien des roches différentes :

1° Le *kaolin*, qui est un silicate d'alumine pur, servant à fabriquer la porcelaine fine, et résultant de la décomposition des feldspaths. Nous avons vu que les feldspaths étaient des silicates doubles d'alumine et d'alcali ; l'alcali se dissout à la longue et laisse un silicate alumineux. Ce qui prouve cette origine, non-seulement pour le kaolin, mais pour les argiles ordinaires, c'est qu'il n'est pas rare d'y rencontrer une certaine proportion d'alcali.

2° Les *argiles ordinaires*, dont le type est l'argile plastique. Ce sont des combinaisons de silice, d'alumine et d'eau ; elles renferment 10 à 12 pour 100 d'eau, sont inattaquables par les acides, forment avec l'eau une pâte ductile dont on façonne les poteries ; l'eau n'y existe qu'à l'état de mélange, parce que le silicate l'absorbe facilement dans une proportion constante, et si l'eau y existait à l'état de combinaison, la roche se dissoudrait dans les acides, car tous les hydrates sont solubles. Cette classe d'argiles prend le nom d'argiles ordinaires ou terre à poteries.

3° Les *argiles smectiques* ou *terre à foulon*. Elles sont attaquables en entier par les acides, renferment 20 à 25 pour 100 d'eau à l'état de combinaison, forment avec l'eau une pâte non ductile, qui se déforme et se gerce au feu. Ces argiles forment avec les graisses un savon terreux, aussi les emploie-t-on à dégraisser les laines sous le nom de terre à foulon ; elles fournissent les meilleures pouzzolanes artificielles.

Entre les deux classes d'argiles, renfermant l'une 12 pour 100 d'eau mélangée, l'autre 25 pour 100 d'eau combinée, on en trouve beaucoup d'intermédiaires qui semblent être un mélange des deux autres.

Les deux classes ne diffèrent pas moins sous le rapport du gisement que sous le rapport des propriétés chimiques.

Les argiles plastiques sont toujours à la base des terrains, immédiatement au-dessus des grès ; ce sont des roches déposées par voie mécanique ; les eaux entraînant des matières solides ont déposé d'abord les gros fragments, lesquels ont formé les grès, puis les particules en suspension, lesquelles ont donné de la vase aujourd'hui transformée en argile. Cette vase provient de la trituration des roches feldspathiques anciennes, qui sont riches en silicate d'alumine, et elle renferme toujours un peu d'alcali.

Au-dessus des grès et des argiles plastiques, on trouve des roches sédimentaires, les calcaires, qui se sont déposés par voie chimique ; entre les couches de précipité calcaire, se sont déposées des couches d'argile, qui sont les argiles smectiques. On les trouve donc à la partie supérieure des formations, et elles ont pris naissance, non par un procédé mécanique, mais par voie de précipitation chimique ; ce sont des argiles hydratées, des sortes de terres auxquelles on ne devrait pas donner le nom d'argiles.

Kaolins. — On peut attribuer la formation des kaolins à la décomposition sur place des roches feldspathiques. Les kaolins ne sont point du silicate d'alumine pur ; on leur fait subir un lavage, et la partie ténue qui reste en suspension dans l'eau et se dépose ensuite dans des bassins, jouit seule des propriétés plastiques nécessaires pour la fabrication des porcelaines fines.

Les kaolins sont des roches d'un beau blanc, quelquefois un peu rose, à texture terreuse et grenue, renfermant des grains de quartz, de feldspath et de mica qui se déposent aussitôt quand on délaye la roche dans l'eau.

Le kaolin durcit par l'action du feu, mais ne fond pas, à moins qu'il ne renferme des grains de feldspath.

On trouve des kaolins dans tous les pays à montagnes granitiques ; quelquefois les petites masses de kaolins ont conservé la forme de cristaux de feldspath, qui tombent en poussière et laissent leur empreinte dans la masse. Les kaolins, susceptibles de servir pour la porcelaine sont rares, car beaucoup renferment de l'oxyde de fer qui colore la pâte, ou de la potasse qui la rend fusible.

Le kaolin de Saint-Yrieix, près Limoges, est réservé à la manufacture de Sèvres.

Argiles plastiques. — La véritable argile plastique est un silicate d'alumine pur ($2\,Al^2O^3, 3\,SiO^3$), elle se prête à un façonnage aussi compliqué que l'on veut sans se briser dans les mains ; elle est infusible, et a beaucoup de peine à perdre toute l'eau qu'elle renferme ; à l'état ordinaire, elle forme des couches imperméables.

Sa couleur est le gris clair ; quelquefois elle est parsemée de taches ferrugineuses, et alors on ne peut l'employer pour la porcelaine ; d'autres fois elle est colorée en noir par du bitume ; mais ce bitume se volatilise par la chaleur, et en somme l'argile noire fournit de la porcelaine blanche.

Après calcination modérée, les argiles plastiques deviennent plus solubles dans les acides, ce qui indique que la combinaison de la silice et de l'alumine est en partie détruite ; dans cet état, les argiles sont très-aptes à donner de bonnes pouzzolanes. Par une forte calcination, au contraire, les argiles deviennent insolubles, et la chaux n'a plus d'action sur les pouzzolanes formées avec ces argiles. Par une chaleur très-élevée, les argiles finissent par perdre toute leur eau : broyées ensuite, elles ne forment plus de pâte ductile ; la combinaison chimique a donc été modifiée par la chaleur.

On trouve, près de Dreux, des argiles complétement infusibles, dont on fabrique les vases réfractaires, creusets de verreries, cornues à gaz, etc.

La terre de pipe est tantôt une argile blanche ou grisâtre, tantôt du kaolin.

Les argiles figulines servent à fabriquer les poteries communes, les terres cuites et les briques ; elles sont moins liantes et moins infusibles que les argiles plastiques qu'elles servent quelquefois à dégraisser. Elles contiennent 5 à 6 p. 100 de chaux carbonatée ou silicatée, avec une plus ou moins grande proportion de fer qui leur donne par la cuisson une teinte rouge ou jaune.

Marnes. — Nous venons de voir que l'argile figuline contient une certaine proportion de chaux ; si cette proportion augmente, on passe aux argiles calcaires et aux marnes. Les marnes renfermant 20 à 25 pour 100 de calcaire sont employées dans l'art du potier pour dégraisser l'argile plastique, l'empêcher d'éprouver par la chaleur un retrait trop considérable et par suite de se gercer.

La véritable marne est celle qui renferme à peu près parties égales de calcaire et d'argile ; elle possède la propriété de se déliter, c'est-à-dire de tomber en poussière à l'air, et on l'emploie comme amendement. Elle produit un effet rapide puisqu'elle se pulvérise et présente en chaque point du sol à la végétation la chaux qui lui est nécessaire.

Nous devons citer encore parmi les argiles : 1° les argiles ocreuses, qui doivent leur couleur à de l'hydrate d'oxyde de fer et que l'on emploie en peinture ; 2° les argiles ferrugineuses qui sont rougies par de l'oxyde de fer non hydraté, et qui, dans certains cas, constituent la sanguine. Les ocres et la sanguine sont des couleurs employées dans les arts.

Argiles smectiques ou d'origine chimique. — Ces argiles ont une cassure esquilleuse et demi-transparente, qui les sépare nettement des argiles précédentes.

Le type de ces argiles est la terre à foulon, employée depuis une haute antiquité au dégraissage des laines et des draps; sa couleur est gris verdâtre, elle est onctueuse et savonneuse, aussi tendre que de la cire, à cassure légèrement esquilleuse, se délite dans l'eau, tombe en poussière par la chaleur et fond au chalumeau pour donner un émail gris.

Ces argiles sont hydratées ainsi que nous l'avons dit; mais, en outre, elles renferment plus d'alumine que les argiles plastiques.

MODES DIVERS DE FORMATION DES ROCHES

Nous avons exposé plus d'une fois dans le cours de l'ouvrage le mode de formation des diverses roches. Nous n'avons ici qu'à résumer et à rappeler ce que l'on sait déjà.

Lorsqu'on pénètre dans les profondeurs du sol, on sent la température croître sans cesse, et l'on reconnaît que cette température s'élève d'un degré centigrade à mesure que l'on descend de 33 mètres. Si l'on songe que le rayon terrestre est d'environ 6,600,000 mètres, en admettant même que la loi d'accroissement de température soit moins rapide quand la profondeur augmente, on ne peut s'empêcher de reconnaître que la température du centre de la terre doit atteindre une élévation dont nous ne pouvons nous rendre compte; à cette température toutes les substances connues doivent être à l'état gazeux, à moins que l'énorme pression qu'elles supportent ne les maintienne liquides.

La théorie de la terre, conçue par Laplace, dans sa mécanique céleste, nous la représente comme formant à l'origine une masse gazeuse incandescente, parcourant son orbite tout en tournant sur elle-même à travers les espaces planétaires.

Or, à mesure que l'on s'élève dans les airs, la température diminue et les aéronautes ont rencontré plus d'une fois sur leur passage des aiguilles de glace; les espaces planétaires doivent donc être à une température très-basse et cette masse gazeuse qui forme aujourd'hui la terre devait rayonner vers les espaces d'énormes quantités de chaleur.

La terre se refroidit donc peu à peu (elle se refroidit encore aujourd'hui), et au centre du globe gazeux se forma un noyau liquide s'accroissant sans cesse; nous verrons en mécanique que ce noyau liquide tournant autour d'un axe devait prendre la forme d'un sphéroïde aplati aux pôles ; la terre solidifiée a gardé cette forme.

Le noyau liquide restait entouré d'une atmosphère gazeuse qui, portée à une haute température devait renfermer les vapeurs de substances que nous ne connaissons aujourd'hui qu'à l'état solide. Ces vapeurs, lourdes et métalliques, occupaient les parties basses de l'atmosphère; les parties hautes étaient remplies par les gaz de nos jours.

Le refroidissement continuant, le noyau liquide finit par se recouvrir d'une écorce solide; mais cette écorce, en se solidifiant, éprouvait un retrait et se fendillait; d'autre part la masse intérieure subissait l'action attractive des astres voisins et s'allongeait dans leur direction, comme l'Océan le fait encore; ces marées souterraines brisaient l'enveloppe, et par les fentes ou failles ainsi formées, s'élançaient des masses liquides qui venaient s'épancher à la surface et s'y solidifier pour former des montagnes.

Ces roches primitives sont les granites anciens et les filons métalliques qu'ils renferment ; ils sont comme la fondation qui supporte notre globe.

Le phénomène se poursuivant, la vapeur d'eau de l'atmosphère finit par se condenser elle-même et par tomber en pluie bouillante sur l'écorce solide, pour se vaporiser de nouveau et remonter dans les espaces. Toutes ces réactions chimiques étaient des sources puissantes d'électricité qui devaient amener des orages et des trombes dont nous ne soupçonnons pas la violence. La terre entière était enveloppée par les eaux.

Les granites s'altéraient rapidement sous l'influence mécanique et chimique des eaux bouillantes et des gaz qu'elles renfermaient en dissolution ; ils se résolvaient en grains plus ou moins fins qu'entraînaient les courants et qui allaient se déposer au sein des eaux tranquilles. Ces dépôts sédimentaires, soumis à l'influence de la chaleur interne, ont éprouvé des effets métamorphiques et ils formèrent les schistes, les gneiss, les argiles schisteuses qui constituent le terrain primitif.

Plus tard, quand la masse eut perdu beaucoup de sa chaleur, l'atmosphère finit par laisser tomber toutes les vapeurs qui la rendaient obscure et qui arrêtaient au passage les rayons solaires nécessaires à la vie. La végétation prit naissance ; trouvant dans l'eau tiède et dans l'acide carbonique de l'atmosphère un aliment puissant, elle se développa rapidement et bientôt fut assez forte pour donner naissance au terrain houiller. En même temps, ne tardaient pas à paraître les premiers animaux ; dans les époques suivantes, la vie végétale et animale devint de plus en plus complexe et ses représentants plus nombreux.

A mesure que l'on s'éloigne de l'origine, les rébellions de la masse liquide enfermée dans le globe deviennent moins fréquentes ; cependant, elles arrivent plus d'une fois à changer la face de la terre et produisent des déluges et des courants liquides détruisant et entraînant les roches sur leur passage. Tous ces débris se déposent ensuite et s'assemblent pour former des assises d'argile, de grès, de sable, etc.

Par les fissures qu'amènent les tremblements de terre, s'élancent des filons, des mélanges d'hydrocarbonates de chaux et de magnésie, qui se délayent dans les eaux, perdent leur excès d'acide et se déposent à l'état de calcaires et de dolomies.

Là, une communication s'établit entre l'intérieur du globe et l'atmosphère, des matières en fusion s'échappent et s'écoulent des cratères pour former des amas de basaltes et de laves.

Les glaciers transportent avec eux des blocs erratiques, des cailloux, des débris de toutes sortes, puis ils fondent et abandonnent toutes ces matières solides.

D'après les explications précédentes, on conçoit bien le mode de formation de toutes les roches, que l'on peut ranger dans trois grandes classes :

1re CLASSE : ROCHES ÉRUPTIVES. . . .	1er *genre*. . . .	granites.
	2e *genre*. . . .	porphyres.
	3e *genre*. . . .	roches volcaniques.
2e CLASSE : ROCHES SÉDIMENTAIRES. . .	1er *genre*. . . .	Roches formées par dépôt mécanique.
	2e *genre*. . . .	Roches d'origine chimique.
3e CLASSE : ROCHES MÉTAMORPHIQUES. .	Gneiss, micachistes, quartzites, calcaires et dolomies saccharoïdes.	

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

Fig. 6.

Fig. 11.

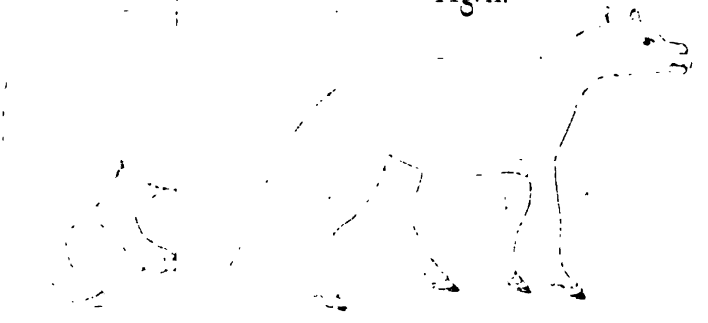
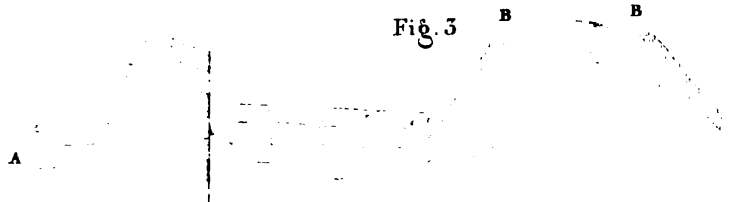
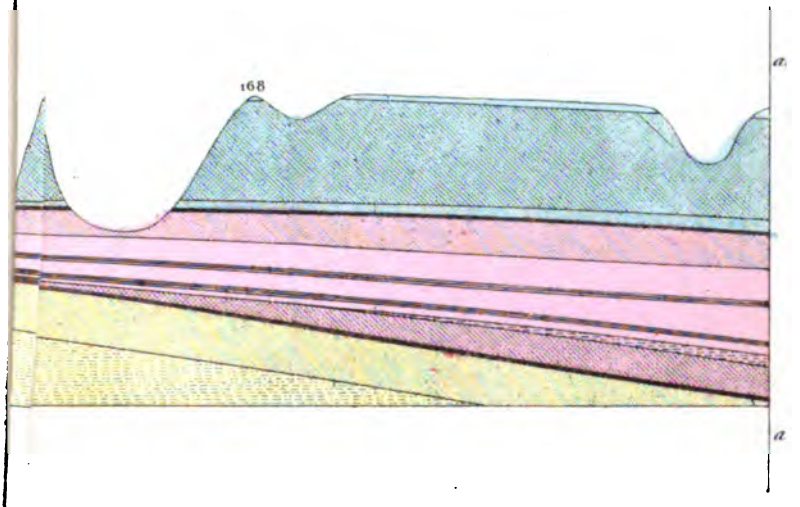


Fig. 3



... artésien de Cormy-la-Ville
... Trappes (Ligne C D de la Fig. 1re Pl. 2)



... artésien de Trappes (Ligne C D de la Fig. 1re Pl. 2)

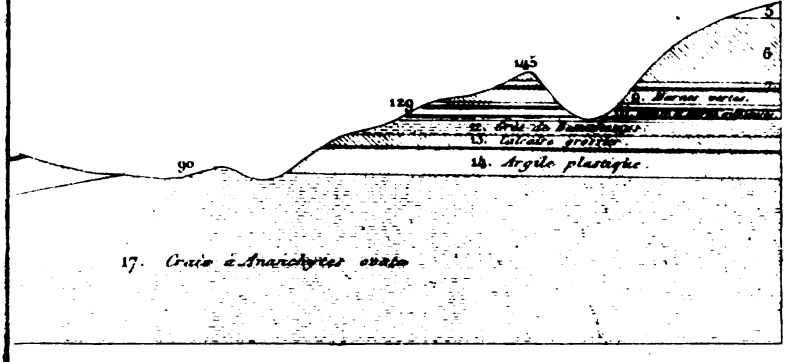


Fig. 6.

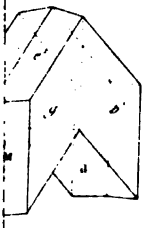


Fig. 7.

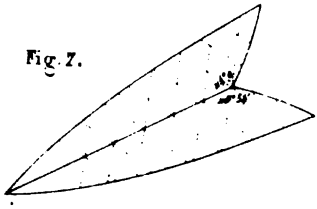


Fig 13.

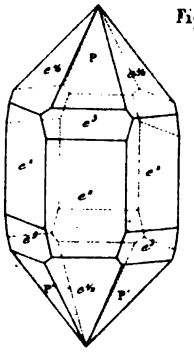


Fig. 14.

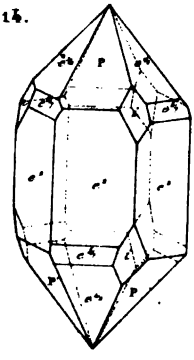


Fig. 21.

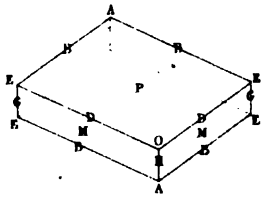
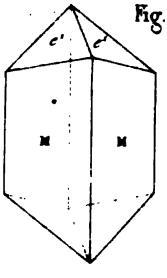



Fig. 22.